

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Механіко-машинобудівний інститут

Кафедра лазерної техніки і фізико-технічних технологій

«На правах рукопису»
УДК 621.375.826

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ І.В. Кривцун

«__» _____ 2018__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

**на тему: «Лазерне формоутворення тонколистових деталей
складної конфігурації в авіа та суднобудуванні»**

Виконав : студент VI курсу, групи МЛ-61м

Кривоногов Євгеній Володимирович

Керівник:

Професор, д.т.н.,

Головко Л.Ф.

Рецензент:

Завідувач кафедри динаміки міцності

машин та опору матеріалів. д.т.н.

Професор,

Бабенко А.Є.

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Механіко-машинобудівний інституту

Кафедра лазерної техніки і фізико-технічних технологій

Рівень вищої освіти – магістерський за освітньо-науковою програмою

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Спеціалізація - 131.1280.1 «Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси
фізико-технічної обробки матеріалів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ І.В. Кривцун

«__» _____ 2018__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Кривоногов Євгеній Володимирович**

1. Тема дисертації «Лазерне формоутворення тонколистових деталей складної конфігурації в авіа та суднобудуванні», науковий керівник дисертації Головка Леонід Федорович, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження - Процеси термодформаційної течії металу при лазерному формоутворенні тонколистових деталей складної конфігурації в авіа та суднобудуванні
4. Предмет дослідження - технологічні закономірності процесу лазерного формоутворення листових елементів обшивки.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити :
 - виконати аналіз існуючих способів надання листовим металам форми;
 - розробити способи лазерного термо-пластичного деформування листів з металу

- виконати моделювання процесу лазерного формоутворення та визначити діапазони змін його параметрів;
- розробити схеми опромінення матеріалу для отримання просторових елементів обшивки.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:

- презентація, що містить аналіз проблеми, тему и основні завдання дослідження, результати дослідження теплових процесів при лазерному формоутворенні, технологічне оснащення, основні технологічні закономірності процесу деформування, висновки.

7. Орієнтовний перелік публікацій :

- тези в конференцій «Інновації молоді в машинобудуванні»

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Літературний огляд, постановка мети та завдання дослідження.		
2.	Математичне моделювання процесу лазерного формування елементів обшивки та корпусу.		
3.	Розробка методик дослідження		
4.	Технологічні закономірності процесу лазерного спікання		
5.	Розробка схем для термо-пластичної обробки листових матеріалів.		
6.	Підготовка доповідей на конференціях в Україні.		
7.	Оформлення дисертаційної роботи, презентації.		

Студент

Кривоногов Є.В.

Науковий керівник дисертації

Л.Ф. Головка

Зміст

Вступ.....	4
Фізична сутність процесу теплового формування листових матеріалів.....	8
Порівняльний аналіз лазерного та дробоударного методів формування.....	14
Розрахунок режимів опромінення для формоутворення параболічної поверхні.....	18
Виведення розрахункових формул для інтенсивності лазерного випромінювання та часу дії.....	29
Виведення залежності переміщень від дії опромінення.....	31
Формоутворення криволінійних поверхонь.....	35
Методика дослідження процесу формоутворення пластин та дисків.....	47
Стійкість металевих конструкцій отриманих лазерним деформуванням..	61
Вибір технологічного обладнання.....	65
Висновки.....	69
Джелела інформації.....	71

ВСТУП

Традиційно для надання листовим матеріалам просторової конфігурації використовується обробка тиском. Це, зокрема, обробка в згинальних та витяжних штампах. Зазначені технології цілком успішно справляються з формуванням деталей з невеликою кількістю згинів. Однак ці види обробки стикаються з цілим рядом проблем, коли необхідно сформувати вироби складнішої конфігурації, або ж вироби виготовлені з пружних, крихких матеріалів. Також при обробці листів значної товщини необхідно використовувати надпотужне крупно габаритне обладнання, застосування якого пов'язане з суттєвими енергетичними та економічними затратами. Окрім того, існує явище зворотного ефекту, що погіршує точність обробки, можливе потоншення матеріалу в зоні обробки та не достатня стійкість до розгинання.

Заради вирішення вищезгаданих проблем почали розвивати методи тепло деформаційного формоутворення (ТДФ), за допомогою локального нагрівання матеріалу та використання термічних напружень для формування деталей. В цих методах використовують різні джерела теплової енергії, зокрема – високочастотне індуктивне нагрівання, обробка зварювальною дугою, обробка факелом газового пальника та обробка лазерним променем. Ці способи формоутворення мають ряд переваг над класичними, з поміж іншого, їх використання призводить до локального потовщення в місці згинання (в класичних відбувається потоншення), що посилює конструкцію і дозволяє конструкторам використовувати листи меншої товщини. Даний процес обробки досить легко автоматизується. Однак, способи ТДФ також мають певні недоліки, пов'язані з визначенням величини теплової енергії та місцем її прикладання для отримання потрібної форми, а також певні проблеми з повторюваністю результатів.

В даній роботі розробляється технологія формувальної обробки листових матеріалів. Для ясності питання слід провести деякі уточнення, зокрема, стосовно того, які матеріали вважаються листовими і якими способами проводять формувальну обробку.

Листовими називаються матеріали товщина яких значно менша за розміри в плані. Листові матеріали можуть тонколистовими та товстолистовими. Листовий матеріал називають тонколистовим, якщо його товщина не перевищує 4мм., товстолистовими називають листові матеріали товщина яких становить 4...160мм.

У вигляді листових можуть бути як вуглецеві, конструкційні чи нержавіючі сталі, так і сплави на основі кольорових металів (в першу чергу міді, алюмінію).

Класичні процеси формування листових матеріалів належать до деформувальних процесів, які класифікуються за температурою, за характером дії сили при обробці та за видом отримуваної продукції:

а) за температурою:

- холодне деформування. Температура деформування лежить нижче температури рекристалізації, переважно при температурі від кімнатної до 250 °C (для сталей);

- гаряче деформування. Температура деформування лежить вище температури рекристалізації;

б) за характером дії сил при обробці:

- пряма дія сили;

- опосередкована дія сили;

в) за видом отримуваної продукції : труби, полоси, листи, профілі, поковки, пресування.

Теплові способи формоутворення листових матеріалів

З метою усунення проблем пов'язаних з формуванням листових матеріалів штамповим інструментом, розробляються та впроваджуються способи теплового формування листових матеріалів.

Формування тепловими джерелами

а) формування за допомогою зварювальної дуги. Використання зварювальної дуги для формоутворення листових матеріалів також можливе, але ускладнене наступними особливостями:

- для зварювальної дуги характерна мала глибина проникнення тепла, що спричиняє схильність поверхні до оплавлення, що викликає погіршення властивостей матеріалу.

- зварювальна дуга, як джерело теплової енергії, слабо контрольована і при збільшенні швидкості переміщення теплового джерела відносно заготовки (чи навпаки), спостерігається нестабільність позиціонування зони розігрівання на заготовці через дрейф стримерів;

б) високочастотне індуктивне нагрівання. Перевага цього джерела теплової енергії полягає в тому, що він дозволяє контролювати глибину проникнення теплового поля, оскільки вона залежить від частоти індукованого електричного поля. Однак цей метод не придатний для використання при нагріванні краю пластини, оскільки перегрівання майже неминуче. Окрім того устаткування досить громіздке.

в) газовий пальник. Є найдешевшим з точки зору купівлі та обслуговування. Але він дещо складний в контролюванні, з точки зору повторюваності кількості газу та з точки зору дотримання постійної відстані до пластини. Окрім того тепловий енерговклад сильно залежить від якості газової паливної суміші.

г) лазерний промінь. Як теплове джерело лазерний промінь являється стабільним та добре визначеним, чітко та легко позиціонується та може

забезпечувати значну швидкість обробки. Його властивості дозволяють дуже легко і точно контролювати локальне введення тепла.

Метою даної роботи є дослідження та математичний опис процесів лазерного теплового формоутворення, та створення схем обробки листових матеріалів для отримання складних криволінійних поверхонь. Причому як просторових так і двовірно зігнутих. Маючи фізичну модель процесу згинання або матеріалу під дією теплового джерела можна аналітично прогнозувати його деформування при тому чи іншому режимі обробки, тим самим, зменшуючи витрати часу на налаштування обладнання для виконання нових технологічних операцій.

Для штучного, малосерійного та гнучкого виробництва затрати часу на перехід з випуску одного виду елементів конструкції до інших повинні бути зменшені до мінімуму. Оскільки від цього напряму залежить його рентабельність. Чим менша кількість матеріалу йтиме на відпрацювання режимів тим вищою буде економія.

Для авіації та суднобудування, а в особливості для створення експериментальних зразків та прототипів нових моделей машин в ньому, технологія листового формування матеріалів, яка має можливість легкого та швидкого налаштування була б вкрай корисною. Автоматизований лазерний комплекс, який міг би створювати просторові поверхні елементів обшивки буде надавати можливість виробникам уникати затрат на виготовлення штампів, фасонних валків, тощо. Такий тип обладнання матиме на порядок ширшу область застосування, оскільки згідно результатів експериментальних досліджень, що велись в напрямку лазерного теплового формоутворення, кінцева форма листа залежить від інтенсивності дії, та закону руху пучка лазера по поверхні заготовки. Окрім застосування у відділі розробок нових моделей літаків або суден, використання такого обладнання можливе і безпосередньо при виробництві машин, що запуснені в серію. При цьому один лазерний комплекс міг би виконувати велику кількість технологічних операцій.(Згинання, випинання, прошивка отворів для елементів кріплення, тощо.)

Фізична сутність процесу теплового формування листових матеріалів.

Метали та більшість їх сплавів мають властивість змінювати свої лінійні розміри при зміні їхньої температури. Це пов'язано зі збільшенням або зменшенням амплітуди коливного теплового руху атомів у вузлах кристалічної решітки відповідно при наданні чи відведенні тепла з об'єму речовини. Причому залежність видовження (при нагріванні) та скорочення (при охолодженні) є практично лінійною. Таким чином відсотковий приріст розмірів тіла дорівнює добутку **коефіцієнту температурного розширення** на величину зміни температури. Деякі речовини в певних температурних діапазонах мають від'ємний коефіцієнт теплового розширення, тобто під час збільшення температури їх розміри або об'єм, у випадку з рідинами, зменшується. Але у металів такого ефекту не спостерігається.

Наслідком наявності такої фізичної властивості є те, що при рівномірному та плавному нагріванні по всьому об'єму, заготовка збільшується пропорційно підвищенню її температури, і якщо в подальшому вона плавно та рівномірно остигне до попередньої температури, то повернеться до своєї попередньої форми. Однак, в разі різкого локального тепловкладу, коли зростання температури матеріалу відбудеться в окремій частині, а решта заготовки не нагріється внаслідок обмеженої теплопровідності, нагріта частина зазнає розширення, а решта матеріалу збереже форму та жорсткість. Що в свою чергу призведе до виникнення напружень в зоні нагріву, і в разі їх зростання вище деякого значення (в залежності від виду металу), відбудеться пластичне деформування в нагрітій зоні.

На даному ефекті базуються два методи термічного формоутворення, а саме:

- Метод випинання(МВ);
- Метод градієнту температур(МГТ);
- Метод зсідання(МЗ).

При застосуванні **методу випинання** (МВ) (рис. 1), розміри опроміненої зони зазвичай приблизно в десять разів більші за товщину листа. Нагрів відбувається майже по всій товщині заготовки із невеликим градієнтом. Під час нагріву знижується жорсткість зони опромінення, разом з тим матеріал розширюється, і будучи обмеженим по краях лазерного пучка піддається стисканню. Якщо зміна температури виявиться такою, що стискання перевищить значення границі стійкості, сформується радіус на поверхні листа. При переміщенні пучка по заготовці випнута зона створить плавний згин. Згинання може відбуватись як назустріч променю так і в протилежний бік.

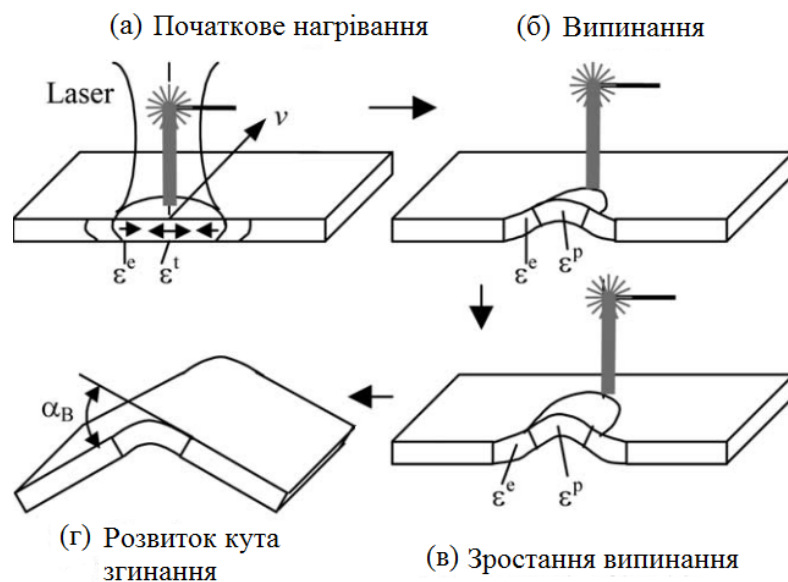


Рис.1. Етапи процесу лазерного формоутворення за рахунок механізму випинання: (а)початкове нагрівання; (б) випинання; (в) зростання випинання; (г)розвиток кута згинання

Дана залежність має комплексний характер та потребує проведення додаткових досліджень. Кут згинання може бути збільшеним шляхом багаторазових проходів лазерного теплового джерела по доріжці, вздовж якої промінь рухався в перший раз. Тепловою задачею при використанні даного методу являється створення зони нагріву, яка матиме велику гнучкість в площині утворення кута та досягнення втрати стійкості на стиск.

В свою чергу **метод градієнту температур** (МГТ) (рис. 2) передбачає різкий нагрів матеріалу листа в межах зони, що спів розмірна з товщиною металу. Загалом, його можна описати наступним чином: під час швидкісного нагрівання поверхні лазерним променем, інтенсивно нагріваються верхні шари матеріалу, а нижні (в результаті обмеженої теплопровідності та локальності дії променя) залишаються холодними. На початку це створює вигин в бік, що протилежний до бажаного напрямку, через виникнення напружень розширення. Після того як відбудеться пластичне температурне деформування тепло буде відводитись вглиб матеріалу за рахунок теплопровідності, що викличе скорочення верхніх шарів металу та формування кута. Причому на відміну від попереднього методу, згин буде різким, утвореним майже по лінії.

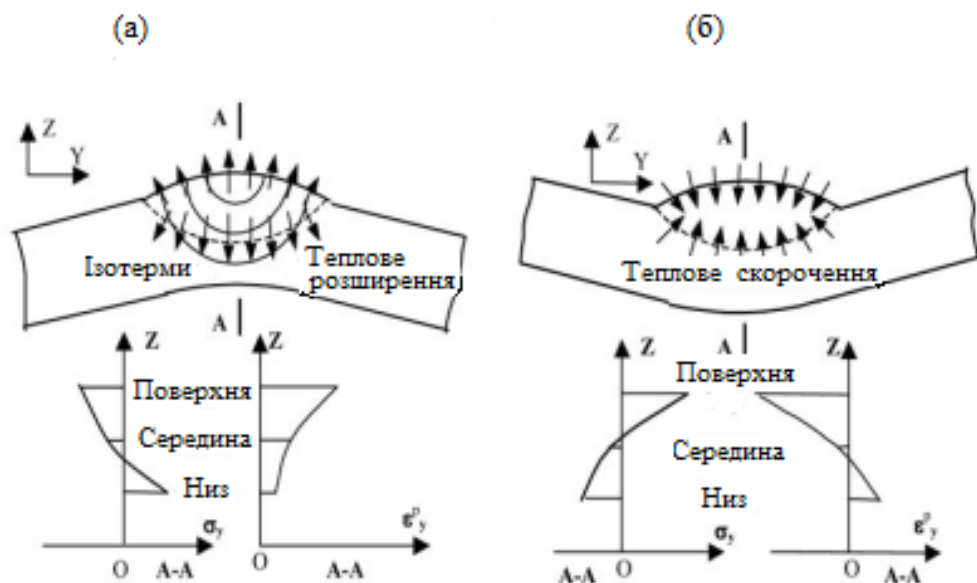


Рис.2. Етапи процесу лазерного формоутворення при дії МГТ (а) процес нагрівання (попереднє згинання); (б) процес охолодження (основне формування).

Це обумовлено тим, що пластичній деформації піддаються значно менша кількість металу, і смуга яку освітив лазерний промінь значно вужча.

Для **методу зсідання** (МЗ) (рис. 3) використовуються режими опромінення що подібні до механізму випинання, але розміри опроміненої зони мають розміри, що значно менші за товщину листової заготовки. Тому заготовка прогривається по всій товщині, і оскільки нагріта зонна обмежена в розширенні,

відбувається локальне термопластичне деформування. Що в подальшому викликає скорочення листа по всій товщині зони термопластичної деформації. Напрямок вигину при цьому залежить від геометрії заготовки та місця дії променя.

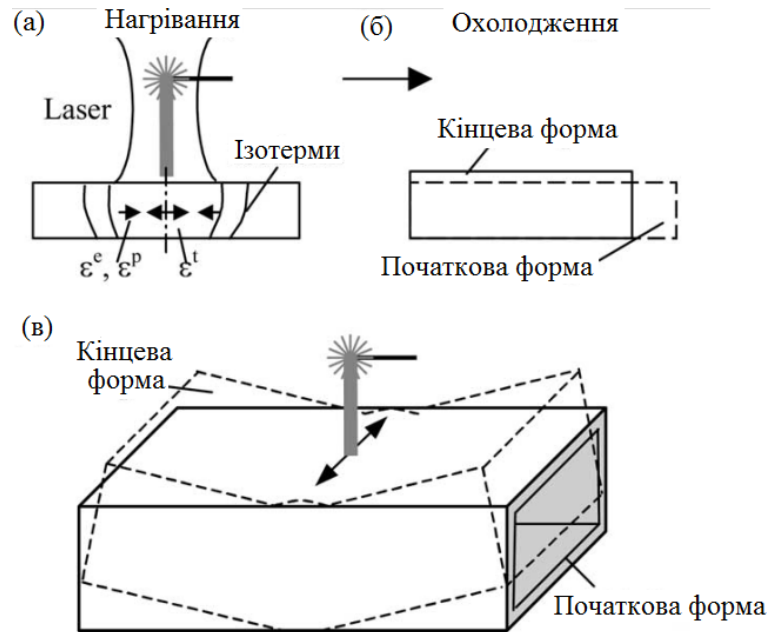


Рис.3. Етапи процесу лазерного формоутворення за рахунок механізму зсідання: (а)нагрівання; (б)охолодження; (в) формоутворення прямокутної труби з використанням МЗ.

Окремим видом теплового формування являється **механізм поліморфних перетворень** (Рис. 4) (МПП). Його суть заснована вже не на локальних температурних переміщеннях, а на явищі автогартування матеріалу в зоні впливу швидкодіючого теплового джерела.

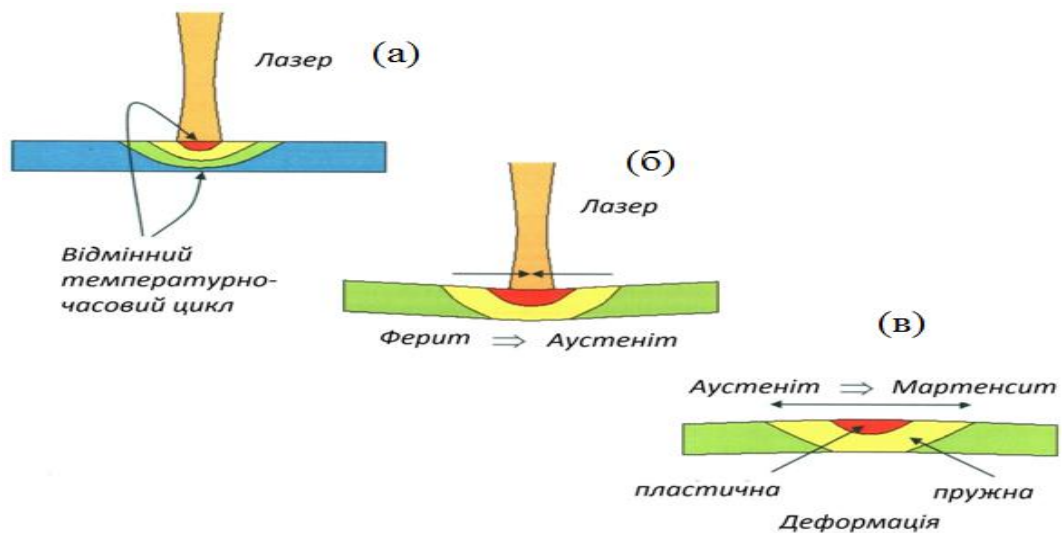


Рис.4. Механізм поліморфних перетворень: а) нагрівання поверхні зразка лазерним променем; б) перетворення фериту в аустеніт під час нагрівання; в) утворення структури мартенситу в результаті автогартування.

Автогартуванню можуть піддаватись як сталі, так і кольорові сплави. Воно виникає внаслідок того, що процеси зростання температури та подальшого остигання матеріалу при русі локального теплового джерела стають вкрай швидкоплинними, що в свою чергу призводить до структурно-фазових перетворень в металі. Так наприклад для сталі, під час нагрівання зони впливу променя, відбувається перетворення фериту та перліту на аустеніт. Дана кристалічна структура має більший період кристалічної ґратки ніж попередньо згадані, тому може розчинити в собі більшу кількість вуглецю. Коли локальна дія лазера припиняється, матеріал різко охолоджується через швидке відведення теплоти в холодний об'єм матеріалу, ґране центрово кубічна ґратка аустеніту перебудовується в альфа форму, але атоми вуглецю не встигають перестроїтись і залишаються в її об'ємі в такій концентрації, що нова фаза, на відміну від фериту, має дуже викривлену та напружену ґратку. Утворюється перенасичений твердий розчин вуглецю в альфа залізі, який має назву мартенсит. Утворення цієї фази викликає «набрякання» матеріалу в зоні термічного впливу, що призводить до створення стискаючих напружень в зоні термічного впливу. Характер розподілу цих напружень залежить від типу сталі, режиму опромінення та

локальності дії теплового джерела, а також ступеня хімічної та структурної однорідності металу. Тому даний метод формування важко прогнозований, і на теперішній час є небажаним. Комбінуючись з іншими методами теплового формування, він може підсилювати, або протидіяти деформації, причому в зонах з різною концентрацією домішок, він матиме різну величину значущості.

Уникнути, або звести його дію до мінімуму можна двома шляхами, а саме:

- Підвищенням швидкодії теплового джерела на матеріал, що призводить до розширення меж температур, для яких не відбувається поліморфних перетворень, внаслідок нерівно важності термодинамічних процесів в заготовці;
- Використання таких температурних діапазонів, при яких перетворення не відбуваються.

В подальшому, навчитись використовувати даний метод формоутворення було б вкрай корисно, оскільки гартований метал має вищу зносостійкість та втомну витривалість при циклічних навантаженнях. Але на даному етапі, необхідне виключення можливості виникнення цього явища, оскільки структурно-фазові метаморфози призводять до зниження прогнозованості результатів вище згаданих механізмів формування. А також можуть викликати зміну форми або напружено-деформованого стану елемента конструкції при старінні чи довготривалій експлуатації в умовах підвищених температур.

Теплове формоутворення базується на принципі зміни напруженого стану в матеріалі за рахунок різних фізичних процесів, що відбуваються в середині металу при дії на нього локальної температури. Основними чинниками, що змінюють напружений стан є:

- Локальні температурні розширення;
- Локальні структурно-фазові перетворення.

Перший чинник має значно вищу прогнозованість дії, і тому саме йому на даному етапі розвитку цієї технології слід віддавати перевагу при впровадженні на виробництві методів теплового деформування.

Від траєкторії та характеру руху теплового джерела, його розмірів та інтенсивності залежить величина та напрямок знак зміни напруженого стану листової заготовки в усіх її точках. За принципом незалежності дії сил, кожен силовий фактор викликає в матеріалі деформацію, незалежно від дії інших. Тому остаточна форма елемента конструкції буде результатом загальної дії всіх силових чинників, які виникають внаслідок термодеоформаційної перебудови.

Порівняльний аналіз лазерного та дробоударного методів формування.

Для суднобудування та авіації основними методами формоутворення поверхонь з листових матеріалів є і залишаються: штампування, витяжка, вигинання по шаблонах, дробоударна (Дробоструменева) обробка.

Обробка на згинальних пресах або вальцювальних верстатах мають високу продуктивність, але дозволяють створювати елементи обшивки тільки одномірної кривизни. Дана операція не може розглядатись як основна, оскільки має ряд обмежень. Конічні та циліндричні деталі можуть бути сформовані за допомогою трьох або чотирьохвалкових пресів, але Згинання-прокатування має високу продуктивність, точність та стабільність, але її застосування обмежене виготовленням складних форм, розмірами робочого простору існуючого обладнання. Для утворення просторових форм подвійної або знакозмінної кривизни використовуються витяжні або обтяжні машини. Обладнання має вертикальні та горизонтальні затискні губки, якими натягує листову заготовку на заздалегідь підготований об'ємний шаблон. Після цього в заготовці утворюються залишкові напруження, які і дозволяють елементу обшивки тримати форму. Недоліком такого методу листового формування являється нерівномірність деформування матеріалу, що призводить до місцевого

потоншення матеріалу або навпаки, може викликати утворення складок та зминів. При формуванні складних просторових поверхонь необхідні викінчувальні операції (Додаткове рихтування). Окрім того заготовка має «облой», місця якими вона затискається в тримачах. Їх в подальшому відрізають і віддають на переробку, тому цей метод пов'язаний з наявністю відходів. Окрім того такий спосіб має низьку продуктивність.

Порівняно дешевшим та зручним є дробоударна обробка листових матеріалів, цей спосіб широко застосовується при створенні листової обшивки корпусу. Його переваги полягають в меншій вартості обладнання, трудомісткості процесу в порівнянні з пресовим обладнанням, а також в підвищенні втомної міцності деталі за рахунок створення в поверхневих шарах

металу напружень стискання. Основною перевагою є повна відсутність ефекту пружного відновлення вихідної форми. Згин відбувається в назустріч бомбардуючому струменю внаслідок утворення на поверхні заготовки стискаючих напружень через вмінання верхніх шарів.

Узагальнений закон Гука:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)) \\ \varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)) \\ \varepsilon_3 = \frac{1}{E}(\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)) \end{cases}$$

Якщо внести в дужки множник E^{-1} то від напружень від перейде до форми де одні переміщення визначають величину інших:

$$\begin{cases} \varepsilon_{1\text{повна}} = (\varepsilon_1 - \mu(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)) \\ \varepsilon_{2\text{повна}} = (\varepsilon_2 - \mu(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)) \\ \varepsilon_{3\text{повна}} = (\varepsilon_3 - \mu(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)) \end{cases}$$

Внаслідок активного створення наклепу в зовнішніх шарах матеріалу, на його поверхні утворюється плоский напружений стан.

$$\begin{cases} \varepsilon_{1\text{повна}} = \varepsilon_1 - \mu\varepsilon_2 \\ \varepsilon_{2\text{повна}} = \varepsilon_2 - \mu\varepsilon_1 \end{cases}$$

Величина та радіус згину залежить від інтенсивності посипання матеріалу дробом, вона може проводитись як з одного боку так і з двох сторін листової заготовки. Але дана обробка має також ряд недоліків серед яких:

- дробоударне формоутворення призводить до значного підвищення шорсткості поверхні, тому після обробки обов'язково виконується додаткова операція зачищення поверхні.
- дробомет — складне технологічне обладнання, яке швидко виходить з ладу, а саме зношення дробу, що значно знижує стабільність процесу та прискорює зношення ротора, сопел та інших елементів;
- При такому виді формоутворення існують обмеження у створенні певних радіусів згинання в залежності від товщини полотна;
- При бомбардуванні дробом на значних швидкостях виникають місцеві локальні зони нагріву, що може призвести до зміни механічних властивостей матеріалу;
- Зміна форми зігнутого даним методом листа внаслідок тривалої дії температури в сто градусів Цельсія;
- Обробка дробом листів великої товщини технічно ускладнюється через можливість виникнення тріщин в процесу згинання;
- Активне перенесення матеріалу дробинки на поверхню деталі значно знижує її корозійну стійкість, через утворення гальванічної пари.
- Зміна форми деталі після шліфування, оскільки частина напруженого шару листа зчищається та зникає наклепаний матеріал;
- Труднощі при роботі з дробом, засмічення приміщень.

Основним недоліком даної технології являється складність автоматизації, потреба високого рівня кваліфікації робітників. Як варіант також існує комбінований метод формоутворення з використанням гідропресу, що

додатково чинить зусилля на заготовку. Але таке обладнання дуже громіздке дороге в експлуатації та обслуговуванні.

Новітній методом формування листових матеріалів за допомогою лазера виключає практично всі вищезгадані недоліки. За рахунок локальності процесу схожий на дробоструменеве формоутворення, але зміна форми зразка відбувається за рахунок швидкого нагрівання та охолодження поверхні металу лазерним випромінюванням.

Даний метод універсальний і значно доцільніший завдяки своїм перевагам:

- Формоутворення здійснюється без механічного контакту інструменту з деталлю у зв'язку з його нематеріальністю;
- За рахунок чіткого дозування енергії можливе отримання форм з максимальною точністю;
- Має значно вищу швидкість обробки порівняно з дробоударною, що зменшує час обробки;
- Підвищує втомну витривалість та покращує механічні властивості матеріалу, не утворюючи при цьому припалів.
- Внаслідок швидкої дії променя окисні реакції на поверхні зводяться до мінімуму.

Дослідження довели що такий вид обробки знижує мікротвердість сплавів алюмінію таких як Д16Т за рахунок місцевого відпалу.

На додачу до всього вищесказаного, лазерне обладнання значно легше контролюється та автоматизується.

Тому, незважаючи на вищу ціну на обладнання, лазерне формоутворення все одно виграє у класичних методів формування обшивки. Розробка та впровадження його у серійному виробництві принесуть користь для промисловості.

Отже дослідження цього методу обробки залишається актуальною задачею в інженерії.

Розрахунок режимів опромінення для формоутворення параболічної поверхні.

Оскільки принцип лазерного формоутворення заснований на локальній дії теплового джерела, формоутворення складних поверхонь можна забезпечити шляхом задавання відповідного закону руху теплового джерела та керуванням його густини потужності.

Під час нагрівання матеріал розширюється, і якщо це розширення нічим не обмежене, після остигання тіло повернеться до попередньої форми. В разі якщо розширенням перешкоджає деяка сила або зв'язок, вони викликатимуть в середині заготовки внутрішні зусилля. Таким чином дія температури має такий самий ефект як і зовнішній силовий фактор. Коли температурні відносні розширення перевищують значення пружної відносної деформації, матеріал починає зминатися. При такому розширенні, матеріал самостійно перебудовується, і під час остигання скорочується, стягуючи місце дії теплового джерела. Такий механізм формоутворення відповідає Методу градієнту температур (МГТ).

Якщо точкове поверхневе теплове джерело рухається по поверхні заготовки, верхні шари матеріалу розжарюються та піддаються впливу температурних розширень, у той час коли оточуючий джерело холодний матеріал обмежує розширюваний об'єм металу. Для забезпечення такої умови необхідно щоб лінійні розміри заготовки були що найменше у вісім – десять разів більшими за товщину листа або смужки. Це обумовлено тим, що холодний матеріал повинен мати достатню жорсткість, щоб забезпечити зминання нагрітих шарів. Величина згину після скорочення матеріалу залежить від геометричних параметрів заготовки, величини коефіцієнта температурних розширень та глибини прогріву матеріалу. Циліндричну поверхню з твірною довільної форми можна отримати шляхом розбиття бічної поверхні на елементарні довжини та створення між ними такого кута згину, щоб вони утворили в результаті параболічний циліндр.

Змінюючи крок між доріжками та значення кута згину між суміжними площадками можна досягти отримання будь якої криволінійної поверхні.

Циліндричні поверхні легко створити шляхом двомірного лазерного формоутворення, оскільки вони відносяться до повністю розгортуваних поверхонь. Тобто можуть формуватись з плоского листа без зминань та розривів.

Механізм градієнту температур найкраще підходить для цієї задачі оскільки доріжка згину виходить співрозмірною із товщиною листа і має досить малий радіус заокруглення, що дає змогу створювати форму профілю із крутою кривизною. У той час коли механізм випинання, по суті являє собою місцеву теплову втрату стійкості. Зона нагріву при цьому методі значно більша за зону нагріву при (МГТ), а зміна температури по товщині заготовки є значно більш плавною. Тому матеріал випинаючись формує значно більший радіус заокруглення, що виключає змогу формування вузьких смужок згину.

Для створення деталі заданої криволінійної форми необхідно знати:

- Механічні властивості матеріалу;
- Теплофізичні параметри матеріалу;
- Геометричні характеристики заготовки;
- Оптичні властивості матеріалу(коефіцієнт поглинання, комплексну діелектричну проникність).

Щоб забезпечити більшу точність теоретичного розрахунку, що буде засновано на описі теплових процесів, які відбуваються всередині матеріалу, необхідно вибрати для експерименту матеріал, в якому не відбуваються поліморфні перетворення під час циклів нагрівання-охолодження. Або забезпечити такі режими теплової дії, щоб вони не викликали значних змін у структурно-фазовому складі матеріалу листа. Однією з цілей даного дослідження буде визначення максимально можливого кута згину за один прохід, при якому не виникатиме розтріскування матеріалу або нестабільності у відтворюваності результату.

Вимогам до відсутності структурно-фазових перетворень добре відповідають нержавіючі хромо-нікелеві сталі. Прикладом такої сталі є **Сталь 12Х18Н10Т** вона відноситься до звичайних корозійностійких. Використовується для виготовлення деталей, що працюють до 600 ° С. і посудини, що працюють в розведених розчинах азотної, оцтової, фосфорної кислот, розчинах лугів і солей та інші деталі, що працюють під тиском при температурі від -196 до +600 ° С, а при наявності агресивних середовищ до +350 ° С.

Таблиця 1. Хімічний склад **Сталі 12Х18Н10Т** % по масі

С	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti
до 0.12	до 0.8	до 2	9-11	до 0.02	до 0.035	17-19	до 0.3	(до 0.8) залишок Fe

Таблиця 2. Механічні властивості не гартованої сталі **12Х18Н10Т**

Сортамент	Размер	Напрям.	σ_B	σ_T	δ_5	ψ	KCU	Термообр.
	мм		МПа	МПа	%	%	кДж / см ²	
Поковки	до 1000		510	196	35	40	215- 372	Гартування 1050- 1100°С, вода,

Даний вид сталі є досить пластичним, і діаграма її розтягу за формою подібна до діаграми маловуглецевої сталі. Діаграма являє собою графічну залежність приросту довжини циліндричного стержня при дії на нього осьового розтягуючого навантаження. Оскільки переріз стержня має постійні розмір та форму по довжині, через відношення P (кН) та Δl (см) можна вивести залежність

σ (МПа) від ε %. Тобто описати залежність між відносною деформацією та нормальними напруженнями.

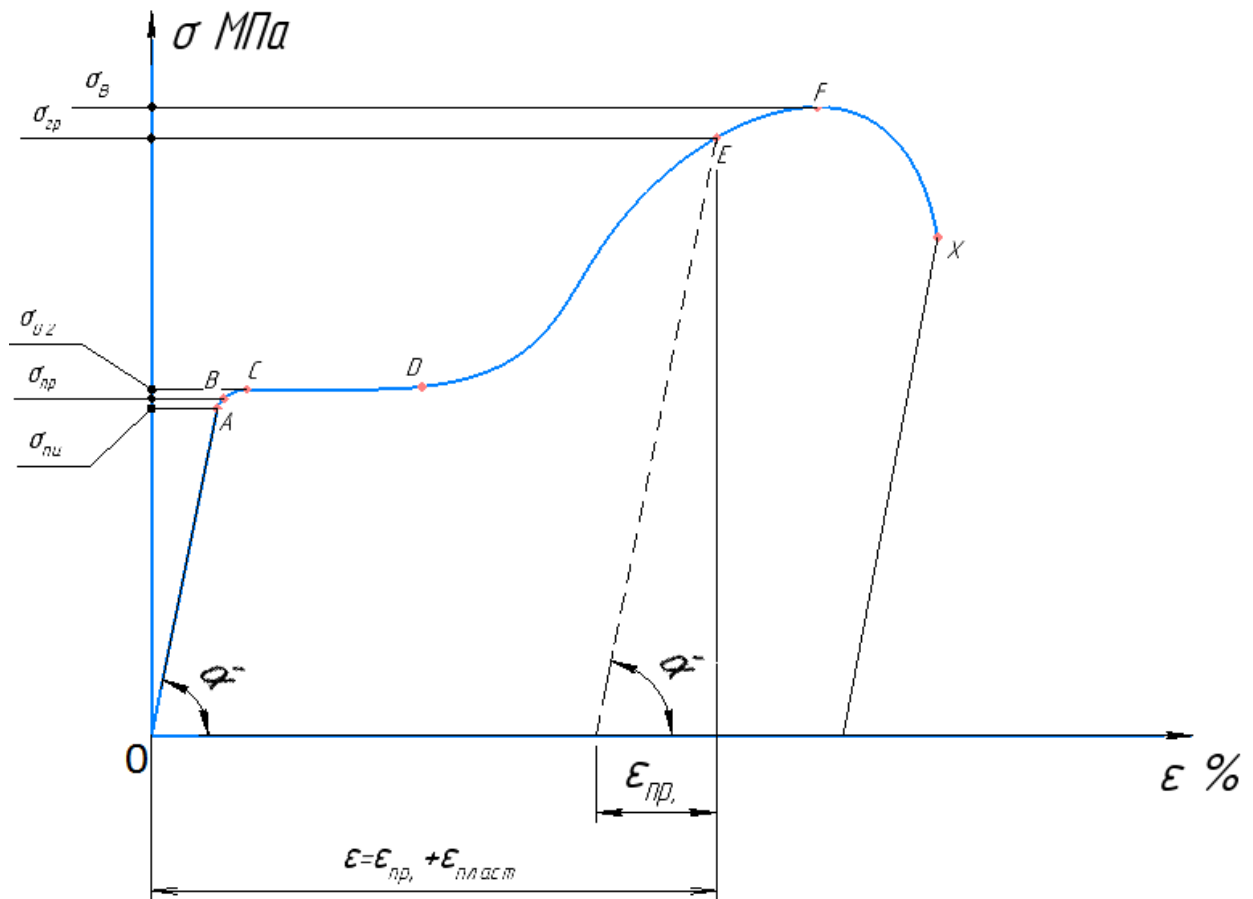


Рис. 6. Діаграма розтягу маловуглецевої сталі.

Першою лінійною ділянкою OA є зона пропорційності, в якій діє залежність описана законом Гука при нормальному розтягу. Наступною йде ділянка AB , на цьому проміжку ще не відбувається пластичних деформацій, але зникає лінійна залежність між напруженнями та відносною деформацією. Після точки B , при невеликому збільшенні зусилля, матеріал зазнає видовження без підвищення навантаження, тому відрізок CD має назву зона текучості, відповідно напруження, що відповідає цьому відрізку називають границею текучості (позн. σ_T або $\sigma_{0.2}$). Далі слідує відрізок DE – зона подальшого видовження, точка E відповідає навантаженню до якого матеріал не зазнає утворення надмірної кількості мікротріщин при деформуванні. І при досягненні точки F , яка

відповідає напруженню тимчасового пору(σ_B) відбувається лавиноподібне руйнування зразка, X – точка розриву.

За першою ділянкою діаграми визначають одну з найважливіших механічних характеристик матеріалу – модуль пружності першого роду, або модуль Юнга (позн. E МПа). Даний коефіцієнт є відношенням нормальних напружень, що діють в поперечному перерізі зразка до його відносної деформації ($\epsilon_{\text{пц}}$). По суті своїй він є кутовим коефіцієнтом похилої лінійної ділянки діаграми. Оскільки відносна деформація є безрозмірною величиною, модуль юнга вимірюється в мегапаскалях.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_{\text{пц}}} \quad (1)$$

$$E = \text{tg}(\alpha) \quad (2)$$

Кутовий коефіцієнт ділянки ОА дорівнює кутовому коефіцієнту прямої, що проходить через точку (E) на діаграмі, тому величину зворотної деформації матеріалу після зняття навантаження можна визначити за принципом:

$$\epsilon_{\text{пр.}} = \frac{\sigma}{E} \quad (3)$$

Повна деформація є сумою пружної та пластичної, тому величину пластичної деформації можна вирахувати по формулі:

$$\epsilon_{\text{пл}} = \epsilon - \epsilon_{\text{пр.}} \quad (4)$$

Де ϵ – величина повної(пружно-пластичної) відносної деформації.

Це дає змогу оцінити остаточну зміну форми заготовки під дією силових факторів.

Нормалізована сталь є досить ізотропним матеріалом, тому напруження, що викликає пластичні деформації при стисканні, буде практично рівним по величині до $\sigma_{0.2}$ при розтягу.

Як відомо, зміна лінійних розмірів тіла може бути обумовлена не тільки дією зовнішніх сил, але й в результаті виникнення внутрішніх зусиль, створених температурними розширеннями. Даний вид деформації залежить від величини

зміни температури в порівнянні з **температурною точкою відліку**(тобто температурою яку вважають початковою), а також коефіцієнта теплових розширень $\alpha_{т.р.}$. Даний коефіцієнт чисельно дорівнює відносній деформації, що виникає в матеріалі при зміні його температури на один градус Цельсія.

Отже величину повної температурної деформації можна виразити :

$$\epsilon = \alpha_{т.р.} \cdot \Delta T \quad (5)$$

Де ΔT – зміна температури матеріалу.

Оскільки дія лазерного променя є локалізованою, а розміри теплового джерела не перевищують товщину заготовки, зона нагрітого матеріалу виходить малою. Холодний матеріал, що оточує джерело зберігає свою жорсткість, і якщо розміри опромінюваної пластинки по довжині та ширині більші за розміри джерела на порядок(дане співвідношення може варіюватись в залежності від властивостей оброблюваного матеріалу), то нагріта зона може бути прийнята як **консольно затиснута з двох боків** ділянка матеріалу, яка зазнає дії температурних розширень.

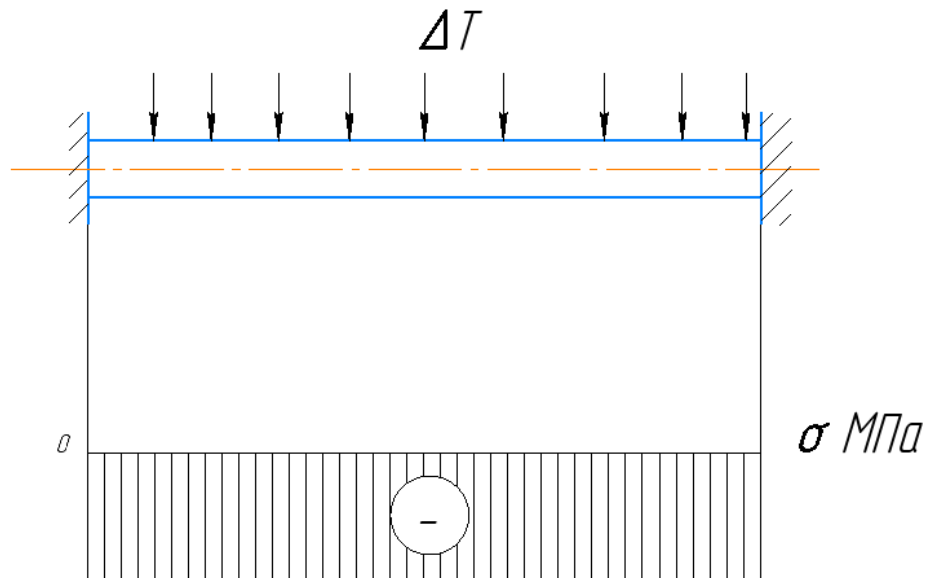


Рис 7. Епюра внутрішніх температурних зусиль, створених обмеженням до видовження.

На (рис. 7) показано епюру стискаючих напружень, оскільки шар матеріалу прагне збільшитись в довжину, але є обмеженим у осьовому напрямку, він зазнає

стиску. Коли розширення перевищать величину пружної деформації, почнеться зминання (опресовка) гарячих шарів. Для цього прирівнюємо величину фіктивного температурного видовження до еквівалентного, що викликане стискаючою силою.

$$\varepsilon_{\text{пр}} + \varepsilon_{\text{пласт}} = \alpha_{\text{т.р.}} \cdot \Delta T \quad (6)$$

Величина пластичної деформації буде дорівнювати:

$$\varepsilon_{\text{пласт}} = \alpha_{\text{т.р.}} \cdot \Delta T - \varepsilon_{\text{пр}} \quad (7)$$

Якщо розбити зону нагріву на елементарні шари по товщині листа, і визначити середню температуру кожного шару, можна визначити сумарну термічну деформацію всіх шарів, та визначити дію еквівалентного внутрішнього силового фактора, який утворить згин по траєкторії руху лазерного променя.

Для металів із високою провідністю, поглинання випромінювання відбувається у тонкому скін-шарі, товщина якого не перевищує 8-10 мкм. Якщо заготовку опромінити круглим лазерним променем із Гаусівським розподілом інтенсивності випромінювання по перерізу, то основна частина тепла виділятиметься на осі променя, по середині доріжки згину.

Таким чином, дію джерела можна представити, в якості **МИГТЄВОГО ТОЧКОВОГО ТЕПЛОВОГО ДЖЕРЕЛА**, яке діє на поверхні напівнескінченної пластини. Зміну її температуру по глибині можна описати рівнянням розповсюдження в тілі тепла від даного виду теплового джерела, оскільки час дії лазерного променя на точку заготовки є досить малим.

Залежність температури точки тіла з координатами (x;y;z) для будь якого моменту часу t(сек.) після введення в точку тіла Q (Дж) теплоти.

$$\Delta T(R; t) = \frac{Q}{C_{\gamma}(2\pi at)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{R^2}{4at}\right) \quad (8)$$

$C_{\gamma}=C_m \rho$ – питома теплоємність матеріалу за об'ємом;

a – коефіцієнт температуропровідності(см²/с);

C_m – Питома теплоємність матеріалу по масі(Дж/г *°C);

ρ – Густина матеріалу (г/см³);

$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (9)$$

R – Відстань відстані від досліджуваної точки до джерела(см).

Коефіцієнт температуропровідності можна обчислити за формулою:

$$a = \frac{\lambda}{C_m \cdot \rho} \quad (10)$$

Для формули, що описує точкове теплове джерело зручніше користуватись саме коефіцієнтами $a(\text{см}^2/\text{с})$ та $C_\gamma(\text{Дж}/\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, оскільки при їх використанні вона є найкомпактнішою. В (Таблиці 3) наведено основні природні властивості матеріалу, над яким пропонується провести досліди. При нагріванні матеріалу, деякі з його механічних та теплофізичних властивостей можуть змінюватись. Зі збільшенням температури збільшуються коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт температурних розширень та питома теплоємність матеріалу. Коефіцієнт температурних розширень змінюється в незначній мірі, тому можна задатись значенням, яке буде середнім арифметичним.

Таблиця 3.

Температур $a \text{ } ^\circ\text{C}$	Модуль пружності E $\text{МПа} \cdot 10^5$	Границя текучості $\sigma_{0,2} \text{ МПа}$	Коефіцієнт температур- ного розширення $\alpha_{\text{т.р}} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 10^{-6}$	Коефіцієнт теплопровід ності $\lambda \text{ Вт}/\text{см} \cdot ^\circ\text{C}$	Тепло- ємність C_m $\text{Дж}/\text{г} \cdot ^\circ\text{C}$ $\cdot 10^{-3}$
100	1.89	280	16.6	0,16	496
200	1.82	250	17	0,18	517
300	1.75	200	17,6	0,19	538
400	1.67	180	18	0,21	550
500	1.61	180	18,3	0,23	563
600	1.53	180	18,6	0,25	575
700	1.43	160	18,9	0,26	596
800	1.35	100	19,3	0,27	596
900	-	-	19,5		

Таким чином отримаємо :

$$\alpha_{т,р} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{т,р i}}{n} \quad (11)$$

$$\alpha_{т,р}=18 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Аналогічно визначимо питому теплоємність та теплопровідність:

$$C_m=538 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/г}^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda=0,2111 \text{ Вт/см}^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Густина даної сталі: } \rho=7,92 \text{ г/см}^3$$

Для спрощення розрахунків необхідно задатись деякими середніми значеннями цих величин, окрім того в формулі коефіцієнта температуропровідності λ та C_m дещо компенсують зростання один одного, роблячи його більш усталеним.

Звідси значення коефіцієнта температуропровідності вийде рівним:

$$a = \frac{0,2111 \text{ Вт/см} \cdot ^{\circ}\text{C} \lambda}{0,538 \text{ Дж/г}^{\circ}\text{C} \cdot 7,92 \text{ г/см}^3} = 4,95 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$$

Об'ємну теплоємність можна визначити за принципом:

$$C \gamma = C_m \cdot \rho = 0,538 \cdot 7,92 = 4,261 \text{ (Дж/см}^3\text{}^{\circ}\text{C)}.$$

В свою чергу, кількість виділеного тепла Q (Дж) є прямо пропорційною часу дії t (сек) і площі плями фокусування $S_{п.ф.}$ (см²). Тому її можна виразити через густину потужності теплового джерела $W_{РА}$. Оскільки частина лазерного випромінювання відбивається, густина потужності поверхневого джерела тепла виражається через добуток інтенсивності лазерного випромінювання та коефіцієнту поглинання:

$$W_{РА}=W_P \cdot A \text{ або } W_{РА}= W_P(1-R) \text{ (Вт/см}^2\text{)} \quad (12)$$

Де A – коефіцієнт поглинання; R – коефіцієнт відбивання.

Таким чином, оскільки пляма фокусування має круглу форму, кількість

теплоти можна виразити:

$$Q = W_{PA} \cdot \frac{\pi d^2}{4} t = \frac{A \cdot W_P \pi d^2 \cdot t}{4} \quad (13)$$

Підставивши даний вираз в функцію температури, отримаємо:

$$\Delta T(R; t) = \frac{A \cdot W_P \pi d^2 \cdot t}{4 C_\gamma (2 \pi a t)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{R^2}{4 a t}\right) \quad (14)$$

Скориставшись властивостями степенів спростимо вираз. Функція прийме остаточний вигляд:

$$\Delta T(R; t) = \frac{A \cdot W_P d^2}{8 C_\gamma \sqrt{2 \pi a^3 t}} \cdot \exp\left(-\frac{R^2}{4 a t}\right) \quad (15)$$

На протилежній до опроміненуваної поверхні розрахункової області крайові умови моделюють теплообмін з навколишнім середовищем за законом

$$\text{Ньютона: } \pm \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha (T - T_c). \quad (16)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище заготовки.

T_c – температура на середині по товщині заготовки.

Як було наведено раніше:

$$\varepsilon = \alpha_{\text{т.р.}} \cdot \Delta T \quad (17)$$

На початку розширень, матеріал зазнає пружної деформації. Тобто існує деяка критична зміна температури $\Delta T_{\text{крит.}}$, після перевищення якої почнеться пластичне деформування шарів матеріалів. Визначити значення цієї зміни температури можна прирівнявши величину максимально можливої відносної пружної деформації матеріалу до величини температурних розширень:

$$\varepsilon_{\text{пр.}} = \alpha_{\text{т.р.}} \cdot \Delta T_{\text{крит.}} \quad (18)$$

Згідно з діаграмою розтягу сталі, пластична деформація починається коли напруження перевищують границю пружності $\sigma_{\text{пр}}$, яка практично рівна $\sigma_{0,2}$.

Отже величину пружних деформацій можна приблизно визначити як:

$$\varepsilon_{\text{пр.}} \approx \frac{\sigma_{0,2}}{E} \quad (19)$$

Прирівнявши між собою два остання вирази, знайдемо критичну зміну температури :

$$\Delta T_{\text{крит}} \approx \frac{\sigma_{0,2}}{E \cdot \alpha_{\text{т.р.}}} \quad (20)$$

Оскільки нагрівання матеріалу починається від температури навколишнього середовища (умовно 20°C), значення коефіцієнта температурних розширень та механічних характеристик слід брати відповідно до цієї температури.

Після визначення цієї критичної температурної зміни, **необхідно задати її положення по глибині прогріву**. Задаючи цей параметр ми задаємо умову для теплового розрахунку, який в свою чергу дозволить з'ясувати яка швидкість переміщення плями фокусування необхідна для забезпечення такого прогріву. А слідом можна обчислити густину потужності лазерного теплового джерела. Температура критична поширюватиметься в матеріалі до тих пір, поки енерговміст в зоні нагріву не зменшиться до того рівня, коли його не вистачатиме для подальшого зростання з віддаленням.

Окрім того положення $\Delta T_{\text{крит.}}$ по глибині h_1 визначатиме кінцеву форму деталі, оскільки від положення нейтральної лінії залежатиме кут згину.

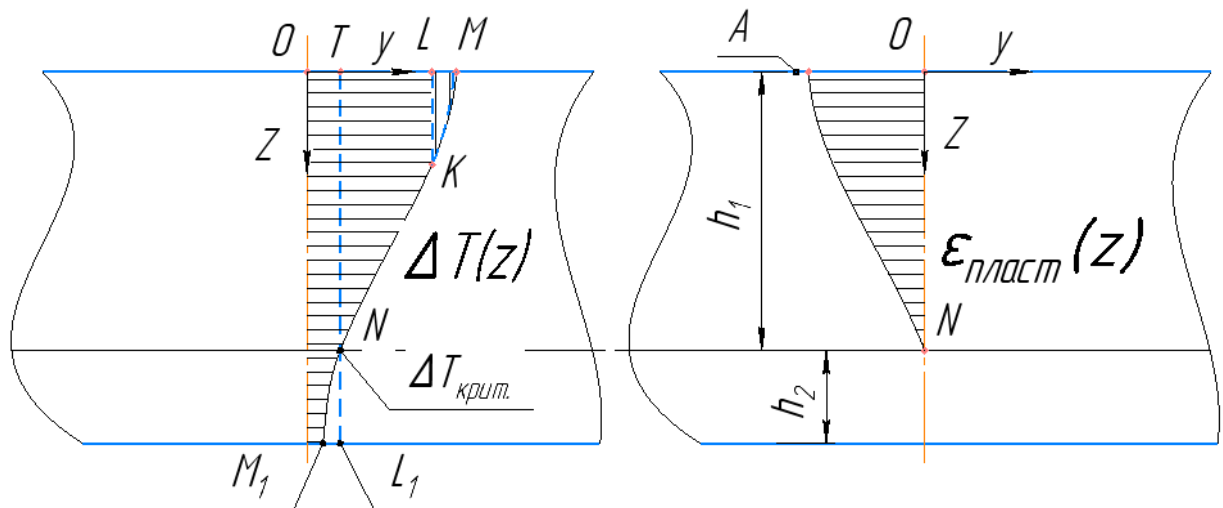


Рис. 8. Енюри температурних розширень та термопластичних деформацій.

На (рис. 8) показано, як буде змінюватись температура матеріалу при віддаленні від центра лазерного пучка. Зауважимо, що нагрів відбувається так, що ізотермічні поверхні являють собою концентричні півсфери із центром в точці О.

Обираючи глибину h_1 потрібно враховувати величину енерговкладу, щоб після припинення дії теплового джерела, подальше поширення теплоти в заготовці відбувалось так само, як і в напівнескінченному тілі.

Виведення розрахункових формул для інтенсивності лазерного випромінювання та часу дії.

Складемо систему двох рівнянь, які є функціями заданої температури $T(R;t)$ на поверхні та на глибині h_1 (см).

$$\begin{cases} T(0;t) = \Delta T_{\text{пов.}} \\ T(h_1;t) = \Delta T_{\text{крит}} \end{cases}$$

Для $R=0$ см. функція Гауса обернеться в одиницю, тому система рівнянь матиме вигляд:

$$\begin{cases} \frac{A \cdot W_P d^2}{8C_Y \sqrt{2\pi a^3 t}} = \Delta T_{\text{пов.}} \\ \frac{A \cdot W_P d^2}{8C_Y \sqrt{2\pi a^3 t}} \cdot \exp\left(-\frac{h_1^2}{4at}\right) = \Delta T_{\text{крит}} \end{cases} \quad (21.1)$$

В даному випадку значення змінної t (сек) відповідає часу дії теплового джерела, за який температура поверхні та температура критичної точки досягнуть заданих значень. З системи очевидно що:

$$\exp\left(-\frac{h_1^2}{4at}\right) = \frac{\Delta T_{\text{крит}}}{\Delta T_{\text{пов.}}} \quad (21.2)$$

Логарифмуючи вираз, можна виразити час дії:

$$-\frac{h_1^2}{4at} = \ln\left(\frac{\Delta T_{\text{крит}}}{\Delta T_{\text{пов.}}}\right) \quad (21.3)$$

$$t = -\frac{h_1^2}{4a \ln \frac{\Delta T_{\text{крит}}}{\Delta T_{\text{пов.}}}} \quad (21)$$

Знак мінус перед формулою обумовлений тим, що значення логарифму, який стоїть в знаменнику буде завжди від'ємним, тому що температурне відношення $(\Delta T_{\text{крит}} / \Delta T_{\text{пов.}})$ знаходиться в межах від 0 до 1.

Визначивши час дії можна виразити інтенсивність:

$$W_P = \frac{\Delta T_{\text{пов.}} \cdot 8C_Y \sqrt{2\pi a^3 t}}{A d^2} \quad (22)$$

d – діаметр плями фокусування (см).

Як тільки значення W_P (Вт/см²) та t (сек.) були визначені, можна переходити до розрахунку швидкості переміщення променя по поверхні заготовки. Температура яка була задана в системі рівнянь виникатиме на осі лазерного пучка, і необхідний час дії повинен бути рівним часу опромінення середини доріжки згину.

Таким чином:

$$V_{\text{л.п.}} = \frac{d}{t} \quad (23)$$

Виведення залежності переміщень від дії опромінення.

Як було зазначено раніше в формулі (7):

$$\varepsilon_{\text{пласт}} = \alpha_{\text{т.р.}} \cdot \Delta T - \alpha_{T=20^{\circ}\text{C}}^{\text{т.р.}} \cdot \Delta T_{\text{крит.}}$$

де $\alpha_{T=20^{\circ}\text{C}}^{\text{т.р.}}$ – коефіцієнт температурних розширень при 20°C .

дана залежність характеризує деформацію елементарного шару матеріалу що має приріст температури ΔT .

Сумарна кількість деформацій в матеріалі це сума деформацій всіх елементарних шарів. Тобто вона чисельно дорівнює площі епюри відносних деформацій в перерізі листової заготовки. Розглянемо профіль перерізу, в якому лежатиме кут згину заготовки (Рисунок 8). Товстими лініями показано ізотерми при яких відбудеться пластичне деформування матеріалу.

Оскільки величина деформації пропорційна температурі, то сумарна деформація, що спричинена дією лазера буде дорівнювати добутку коефіцієнта теплового розширення на інтеграл функції температури по радіусу зони нагріву, який дорівнює h_1 .

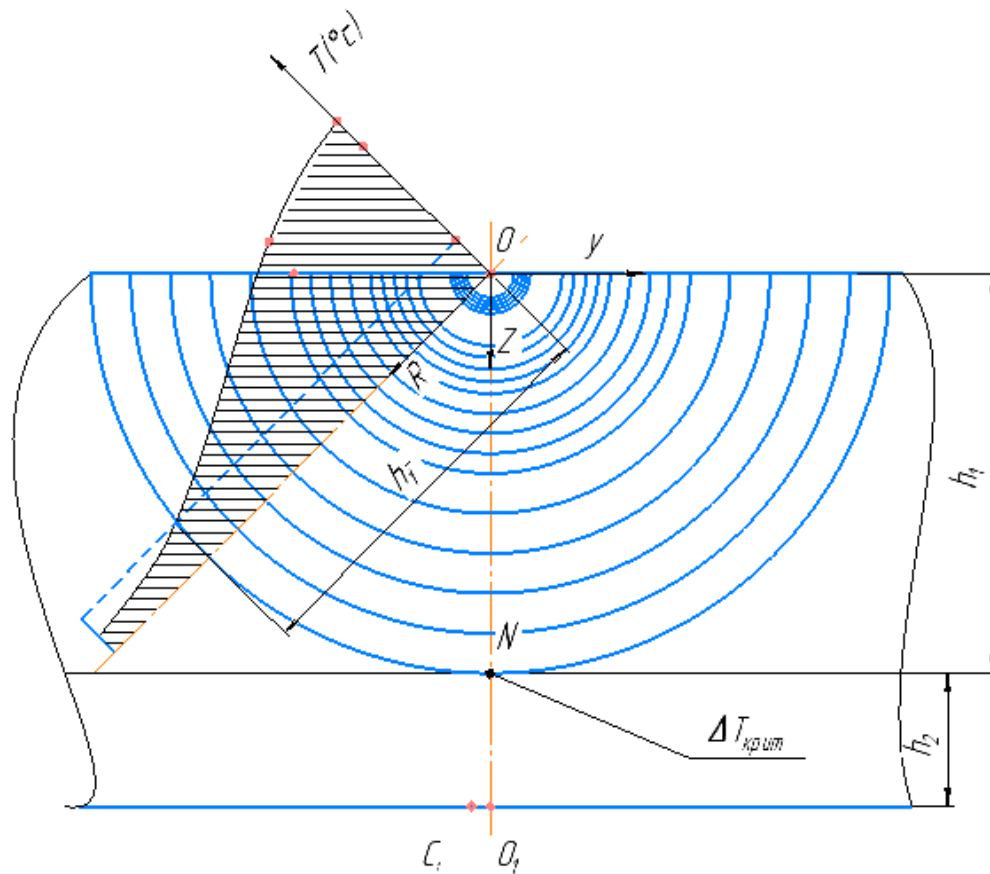


Рис.9 Температурний розподіл в профілі доріжки згину

Інтеграл дозволяє обчислити суму всіх пластичних деформацій в елементарних шарах матеріалу, які знаходяться на відстані R від точки O . Значення довжини дуги кола ізотерми, що знаходиться на відстані R від центра пучка, можна виразити помноживши радіус на число π .

$$l \sum \varepsilon = \alpha_{\text{т.р.}} l \int_0^{h_1} \Delta T(R) dR = \alpha_{\text{т.р.}} \cdot \int \frac{A \cdot W_p d^2 \pi R}{8 C_y \sqrt{2 \pi a^3 t}} \cdot \exp\left(-\frac{R^2}{4at}\right) dR \quad (24.1)$$

Винесемо перед знаком інтегралу дріб:

$$l \sum \varepsilon = \alpha_{\text{т.р.}} \frac{A \cdot W_p d^2 \pi}{8 C_y \sqrt{2 \pi a^3 t}} \int_0^{h_1} R \exp\left(-\frac{R^2}{4at}\right) dR \quad (24.2)$$

Зведемо підінтегральний вираз до вигляду:

$$-\int_0^{h_1} \exp(-u^2) du^2 = -\frac{1}{2} \exp(-u^2) \quad (24.3)$$

Для цього занесемо R під знак диференціалу:

$$u du = \frac{du^2}{2} \text{ тоді: } d\left(-\frac{R^2}{4at}\right) = -\frac{2R}{4at} dR$$

$$-2at \int_0^{h_1} \exp\left(-\frac{R^2}{4at}\right) dR^2 = -2at \exp\left(-\frac{R^2}{4at}\right) \Big|_0^{h_1} =$$

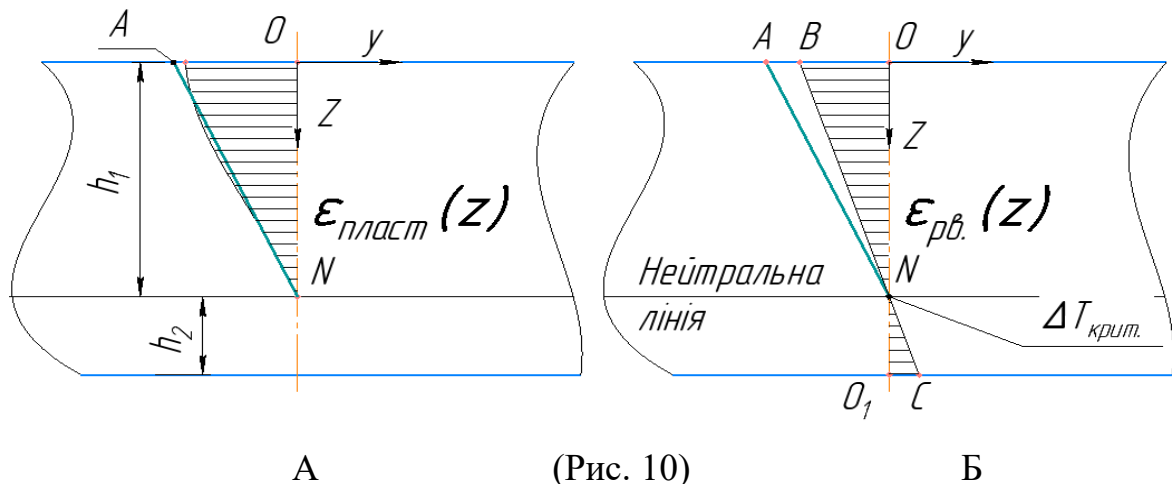
$$= 2at \left(1 - \exp\left(-\frac{h_1^2}{4at}\right)\right) \quad (24.5)$$

Після підстановки виразу(24.5) в формулу(24.2) отримаємо:

$$l \sum \varepsilon = \alpha_{\text{т.р.}} \frac{A \cdot W_P d^2 \sqrt{\pi t}}{4C_Y \sqrt{2a}} \left(1 - \exp\left(-\frac{h_1^2}{4at}\right)\right) \quad (24)$$

Коли матеріал остигне до температури навколишнього середовища в ньому залишаться тільки пластичні деформації. Їх дія розподілиться так, що заготовка прийде до певного рівноважного стану по перерізу. Такий стан можна представити еквівалентним, лінійно розподіленим по перерізу($\varepsilon_{\text{р.в.}}(z)$).

Якщо від сумарної кількості температурних деформацій відняти сумарну кількість пружних, то отримаємо сумарну кількість деформацій які викликають згин.



На рисунку 4А показано кількість пластичних деформацій та їх розподіл після досягнення рівноважного стану. На рисунку 4Б ε_{COI} – деформація пружного стиску під дією скорочення пластично здеформованих шарів матеріалу.

Поглянувши на (рис.10А) та (рис.10Б) можна побачити, що частина дії сумарних пластичних деформацій піде на згин смуги пластинки, яка знаходиться

нижче точки N. Для їх врахування задамось умовою, що сумарна кількість деформацій в рівноважному стані, дорівнює кількості всіх пластичних деформацій. Розрахуємо наближено кут згину, який би виник, в разі відсутності опору з боку частини пластинки товщиною h_2 . Так як тепло поширюється сферично по об'єму заготовки, в перерізі згину буде отримано коло. Площа цього кола зросте при нагріванні на величину сумарної кількості деформацій. Площа сектора кола дорівнює добутку:

$$S_{\text{сект.}} = \frac{\theta h_1^2}{2} \quad (25)$$

Де θ – значення кута, який обмежує цей сектор в радіанах.

Прирівняємо вирази (24) та (25) :

$$\frac{\theta h_1^2}{2} = \alpha_{\text{т.р.}} \frac{A \cdot W_P d^2 \sqrt{\pi t}}{4 C_Y \sqrt{2a}} \left(1 - \exp \left(-\frac{h_1^2}{4at} \right) \right) \quad (26)$$

Далі накладемо дію пружного опору смужки. Оскільки після остигання в перерізі встановиться рівноважний деформований стан, представимо його еквівалентним, і спричиненим зовнішнім силовим фактором (рис.4Б).

Поділивши вираз (26) коефіцієнт пропорційності площ O_1NC та OBC отримаємо :

$$\theta = \alpha_{\text{т.р.}} \left(\frac{A \cdot W_P d^2 \sqrt{\pi t}}{2(h_1^2 + h_2^2) C_Y \sqrt{2a}} \left(1 - \exp \left(-\frac{h_1^2}{4at} \right) \right) - \Delta T_{\text{крит.}} \right) (\text{Рад.}) \quad (27)$$

Дана формула показує, до якого кута прагне вигнутись заготовка після остигання, в будь якій площині, що проходить через вісь лазерного пучка. Зауважимо, що випинання нагрітого матеріалу відбувається не тільки в площині, що перпендикулярна лінії згину, але й вздовж неї. Під час формування згину в по прямій, всередині доріжки згину утвориться плоский напружений стан. При цьому величина деформацій, що утворюють кут згину збільшується в $\frac{1}{\mu}$ разів, остаточно отримаємо :

$$\theta = \alpha_{\text{т.р.}} \left(\frac{A \cdot W_p d^2 \sqrt{\pi t}}{2\mu(h_1^2 + h_2^2) C_y \sqrt{2a}} \left(1 - \frac{\Delta T_{\text{кр}}}{\Delta T_{\text{пов}}} \right) - \Delta T_{\text{крит.}} \right) \quad (27)$$

Де μ – Коефіцієнт Пуассона ;

h_1 – Глибина-положення нейтральної лінії (см).

h_2 – Залишкова глибина(см).

З формули видно, що чим більшою буде величина заглиблення критичної ізотерми, тим більшим буде кут згинання. Він досягне свого максимального значення, якщо глибина буде рівна товщині заготовки. Але при цьому необхідно забезпечити додаткове охолодження поверхні, що протилежна опромінюваній. Також можна обрати таку глибину критичного прогріву при якій тепло розсіюватиметься в заготовці не спричиняючи небажаних деформацій, але при цьому зменшиться значення кута.

Формоутворення криволінійних поверхонь.

Форму профілю листової деталі можна описати неперервною математичною функцією. Оскільки завдання полягає в тому щоб сформувати параболічну поверхню, необхідно взяти таку функцію, яка задає цю криву. Існують різні функції, що задають побудову цієї лінії в Декартовій прямокутній системі координат, але для визначення кутів повороту на елементарних площадок найкраще підійде :

$$y = J\sqrt{x} \quad (28)$$

Де J – коефіцієнт, що задає форму(кривизну) графіку.

Графіком цієї функції є гілка параболи із початком в точці $x=0$; $y=0$.

На рис.11 показані графіки цієї функції для $J=1$ та $J=2$, якщо значення лежить в межах $0 < J < 1$, графік витягуватиметься вздовж осі іксів.

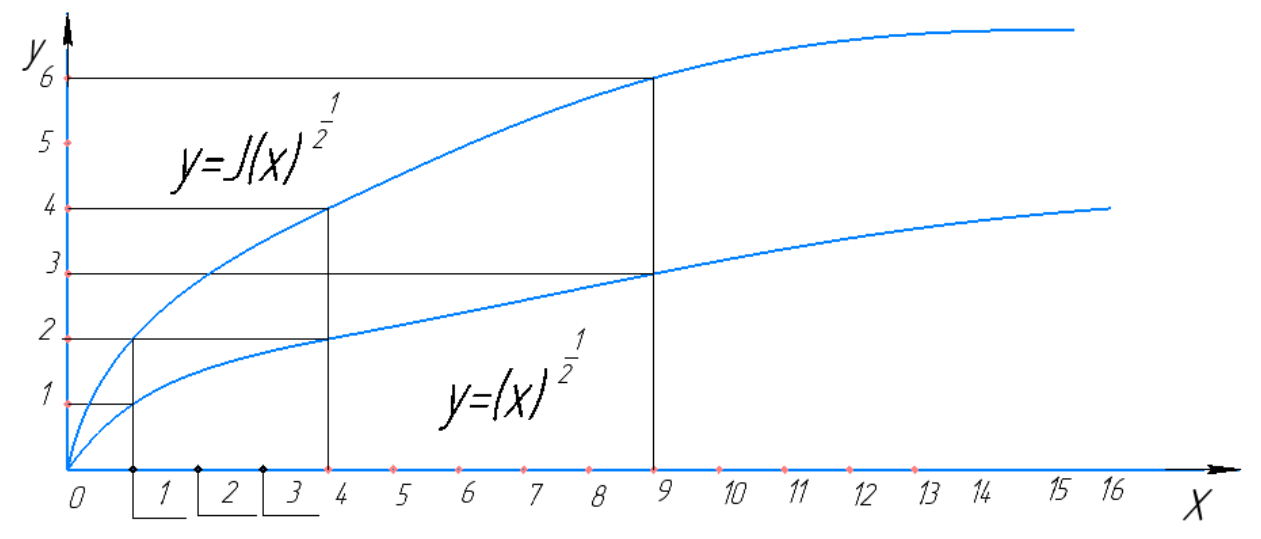


Рис.11 Гілка параболі в прямокутній ДСК.

Похідна для даної функції має вигляд:

$$y' = \frac{J}{2\sqrt{x}} \quad (29)$$

За геометричним змістом похідної, її значення в деякій точці x_0 дорівнює тангенсу кута нахилу дотичної, що проведена до графіка в точці із координатами $(x_0 ; y_0)$.

Якщо розбити графік на точки $(x_1 ; x_2 ; x_3 ; x_4 \dots x_n)$, що відповідають кроку між доріжками згину, знайти значення похідної в кожній з них, а потім через функцію арктангенса знайти значення кутів нахилу дотичних. То по чередно віднімаючи значення кутів:

$$\theta_0 = \pi/2 - \alpha(x_1)$$

$$\theta_1 = \alpha(x_1) - \alpha(x_2)$$

$$\theta_2 = \alpha(x_2) - \alpha(x_3)$$

і так далі, можна визначити кути згину між елементарними площадками. Чим більшою буде кількість елементарних площадок, тим більш плавною буде форма кінцевої деталі. На (рис.12) показано вигляд графіка, який утворено перетином дотичних.

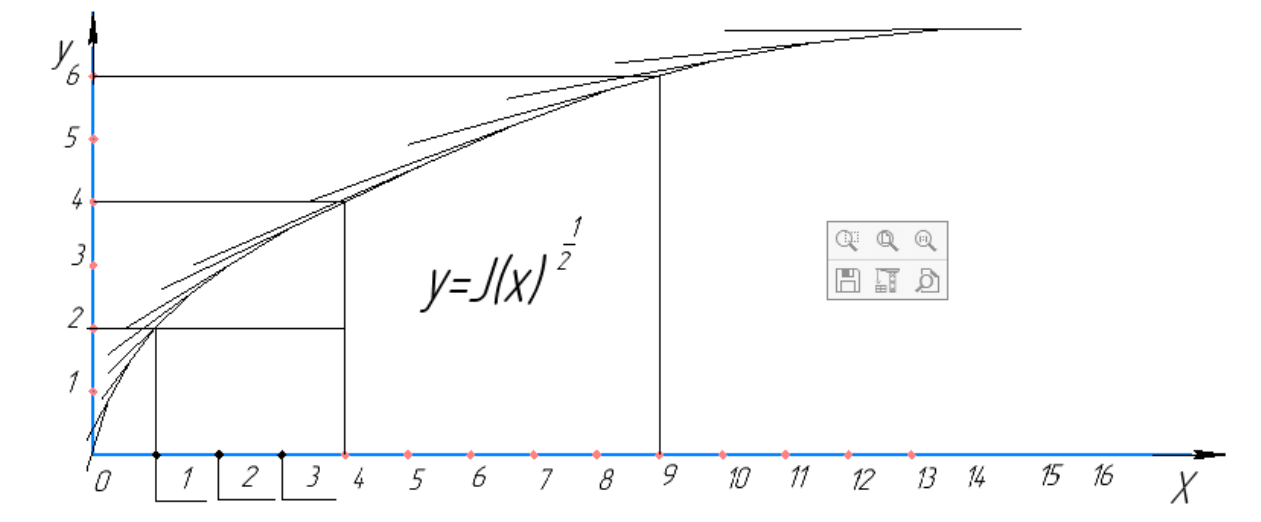


Рис.12 Псевдопарабола, утворена перетином множини дотичних до графіка.

Значення будь якого елементарного кута згину можна визначити:

$$\theta_n = \arctg\left(\frac{J}{2\sqrt{x_n}}\right) - \arctg\left(\frac{J}{2\sqrt{x_{n+1}}}\right) \quad (30)$$

Вирішивши зворотну задачу по знаходженню температури поверхні при заданих куті згину та глибині шару з критичною температурою, можна знайти густину потужності та швидкість переміщення лазерного пучка.

Щоб заготовка прийняла форму, яка відповідає вимогам, положення доріжок опромінення повинно бути чітко визначеним.

Оскільки формоутворення відбувається з листової плоскої заготовки, її довжина оброблюваної частини повинна бути такою самою як довжина кривої, яку ми хочемо отримати. До того ж крок між площадками згину потрібно робити таким, щоб він також відповідав довжини кривої між точками $(x_n; x_{n+1})$. Визначити величину кроку та довжину заготовки можна через геометричний зміст криволінійного інтеграла.

$$|L| = \int_L dl \quad (31.1)$$

$$dl = \sqrt{(dx)^2 + \frac{J(dx)^2}{4x}} \quad (31.2)$$

Довжина заготовки рівна:

$$|L| = \int_0^{x_n} \sqrt{1 + \frac{J}{4x}} dx \quad (31)$$

Крок між доріжками:

$$\delta = \int_{x_{n-1}}^{x_n} \sqrt{1 + \frac{J}{4x}} dx \quad (32)$$

В ході роботи було виведено залежність між температурною дією на листову заготовку та утворенням згину в місці опромінення.

Виведені формули можна використовувати в інженерних розрахунках режимів обробки листових матеріалів.

Приклад розрахунку значення кута при заданому режимі опромінення.

Нехай товщина пластини із сталі **12X18H10T** становить 2 мм.

$$\alpha_{т.р}=18 \cdot 10^{-6} \text{ (}^{\circ}\text{C}^{-1}\text{)};$$

$$a=0,0495 \text{ (см}^2\text{/с)}; C \gamma=4,261 \text{ (Дж/см}^3\text{}^{\circ}\text{C)};$$

$$E=1,9 \cdot 10^5 \text{ (МПа)}; \mu=0.31;$$

$$\sigma_{0,2}=200 \text{ (МПа)}; \alpha_{т.р}^{20^{\circ}\text{C}}=16 \cdot 10^{-6} \text{ (}^{\circ}\text{C}^{-1}\text{)}$$

$$\text{Задамо } h_1=0,2 \text{ см. } d=0,2 \text{ см.}$$

Визначимо величину критичної температури:

$$\Delta T_{\text{крит}} \approx \frac{\sigma_{0,2}}{E \cdot \alpha_{т.р}^{20^{\circ}\text{C}}} = \frac{200}{1,9 \cdot 1.6} = 63^{\circ}\text{C}$$

Щоб уникнути структурно-фазових перетворень обмежимо температуру нагріву до 700°C.

Тоді час опромінення повинен бути рівним:

$$t = -\frac{h_1^2}{4 a \ln \frac{\Delta T_{\text{крит}}}{\Delta T_{\text{пов.}}}} = -\frac{0,04}{4 \cdot 0,0495 (-2,4239)} = 0,084 \text{с}$$

Швидкість переміщення променя складе:

$$V_{\text{л.п.}} = \frac{d}{t} = \frac{0,2}{0,084} = 2,38 \text{ см/с}$$

Необхідна поглинута густина потужності:

$$AW_P = \frac{700 \cdot 8 \cdot 4,261 \sqrt{2\pi 0,0495^3 \cdot 0,084}}{0,04} = 4772 \text{ Вт/см}^2$$

Всі необхідні компоненти для визначення кута згину визначено. Кут згину дорівнює:

$$\theta = 18 \cdot 10^{-6} \left(\frac{4772 \cdot 0,04 \sqrt{\pi 0,084}}{2 \cdot 0,04 \cdot 4,261 \cdot 0,31 \sqrt{2 \cdot 0,0495}} (1 - 0,06) - 63 \right)$$

$$\theta = 0,315 \text{ (рад.)}$$

Переведемо в градусну міру:

$$\theta = 18^\circ$$

Задавшись певною фіксованою глибиною термопластичного прогріву можна розраховувати режими опромінення для згинання заготовки на бажаний кут. Оскільки глибина залежить в основному від часу дії променя в силу обмеженої швидкості теплопередачі вглиб матеріалу, її положення переважно залежатиме від швидкості переміщення пучка. Визначним фактором температури поверхні при цьому буде густина потужності.

В таблиці 4 представлено математичні розрахунки положень доріжок згину відносно початкової координати, режим обробки листової заготовки товщиною 2мм.

Діаметр плями лазерного променя на поверхні листа становить 2мм.

Розподіл інтенсивності випромінювання в перерізі пучка є Гаусовим.

Таблиця 4. Режими обробки листової заготовки при переміщенні пучка по прямій для кожного елементарного кута згину при утворенні параболічної поверхні з металевого листа сталі 12Х18Н10Т.

Положення доріжки Хп (см.)	Елементарний кут(рад)	Крок між доріжками (см)	Густина потужності(поглинутої)	Швидкість подачі(см/с)
0,1	0,3062	0,640	3670	3,4
0,2	0,1143	0,280	2080	7,2
0,3	0,0806	0,225	2056	8,6
0,4	0,0628	0,197	2027	8,7
0,5	0,0515	0,180	2001	9,7
0,6	0,0436	0,168	1975	10,4
0,7	0,0376	0,159	1948	11,2
0,8	0,0330	0,153	1922	11,9
0,9	0,0293	0,148	1895	12,7
1	0,0263	0,143	1869	13,4
1,1	0,0238	0,140	1842	14,2
1,2	0,0217	0,137	1816	14,9
1,3	0,0199	0,134	1789	15,7
1,4	0,0183	0,132	1763	16,4
1,5	0,0170	0,130	1736	17,2
1,6	0,0158	0,128	1710	17,9
1,7	0,0147	0,127	1683	18,7
1,8	0,0137	0,125	1657	19,4
2	0,0250	0,247	1630	20,2
2,4	0,0423	0,483	1604	20,9
2,8	0,0345	0,471	1577	21,7
3,2	0,0289	0,462	1551	22,4

Положення доріжки Xn (см.)	Елементарний кут(рад)	Крок між доріжками (см)	Густина потужності(поглинутої)	Швидкість подачі(см/с)
4	0,0214	0,450	1498	23,9
4,4	0,0188	0,445	1471	24,7
4,8	0,0167	0,441	1445	25,4
5,2	0,0149	0,438	1418	26,2
0,3	0,0806	0,225	2056	8,6
3,6	0,0247	0,455	1524	23,2
5,6	0,0135	0,435	1392	26,9
6	0,0122	0,433	1365	27,7
6,4	0,0112	0,431	1339	28,4
6,8	0,0102	0,429	1312	29,2
7,2	0,0095	0,428	1286	29,9
7,6	0,0088	0,426	1259	30,7
8	0,0081	0,425	1233	31,4
8,4	0,0076	0,424	1206	32,2
8,8	0,0071	0,423	1180	32,9
9,2	0,0067	0,422	1153	33,7

Дана таблиця дає змогу створити гілку параболи (рис. 12) задавши параметри потужності та швидкості руху теплового джерела. Оскільки параболічний циліндр або напівциліндр має осьову симетрію, достатньо просто провести обробку металевої пластини по частинам, щоб в результаті отримати частину корпусної обшивки заданої форми.

На рисунку 13 показано схему обробки при утворенні параболічного циліндру із металевої смуги.

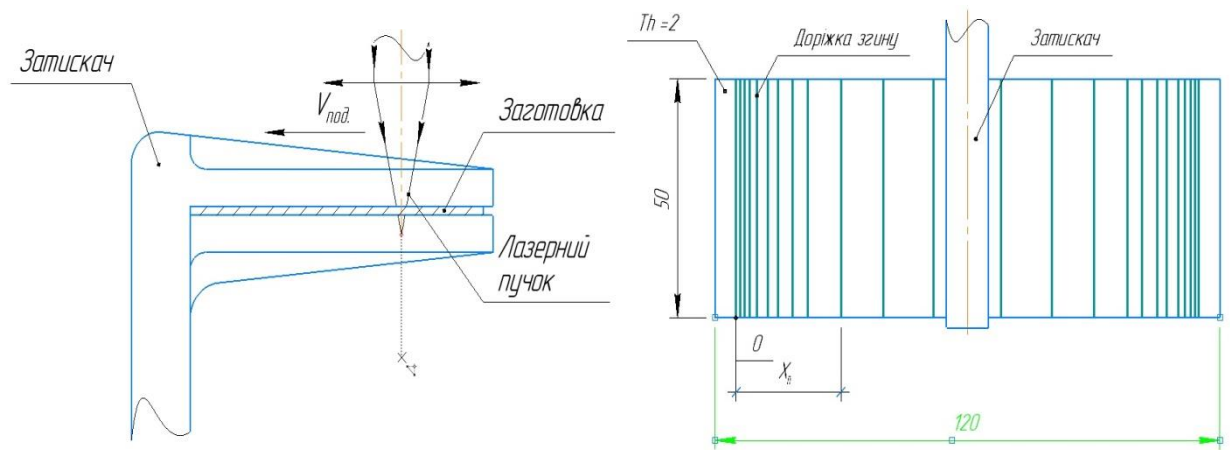


Рис.13 Схема обробки.

Всі металічні матеріали підпорядковані загальним основним механізмам деформування під дією лазера.

Наведений спосіб лазерного формоутворення може бути використаний як для сталей, так і для кольорових листових металів чи сплавів. Виключення складає тільки інвар, в силу його фізико-механічних властивостей, а саме високої міцності та мізерно малого коефіцієнта температурного розширення, такий спосіб формування для нього буде не ефективним, а то і неможливим.

Щодо алюмінію, дюралевих сплавів та інших матеріалів, які використовуються в суднобудуванні та літакобудуванні, закономірності деформації під дією локального нагріву залишаються подібними. На (рис.15) Показано діаграми їх розтягу. А особливості їх обробки лазерним пучком залежатимуть від всіх тих самих факторів, які було використано при виведенні залежності величини деформації від умов опромінення вище.

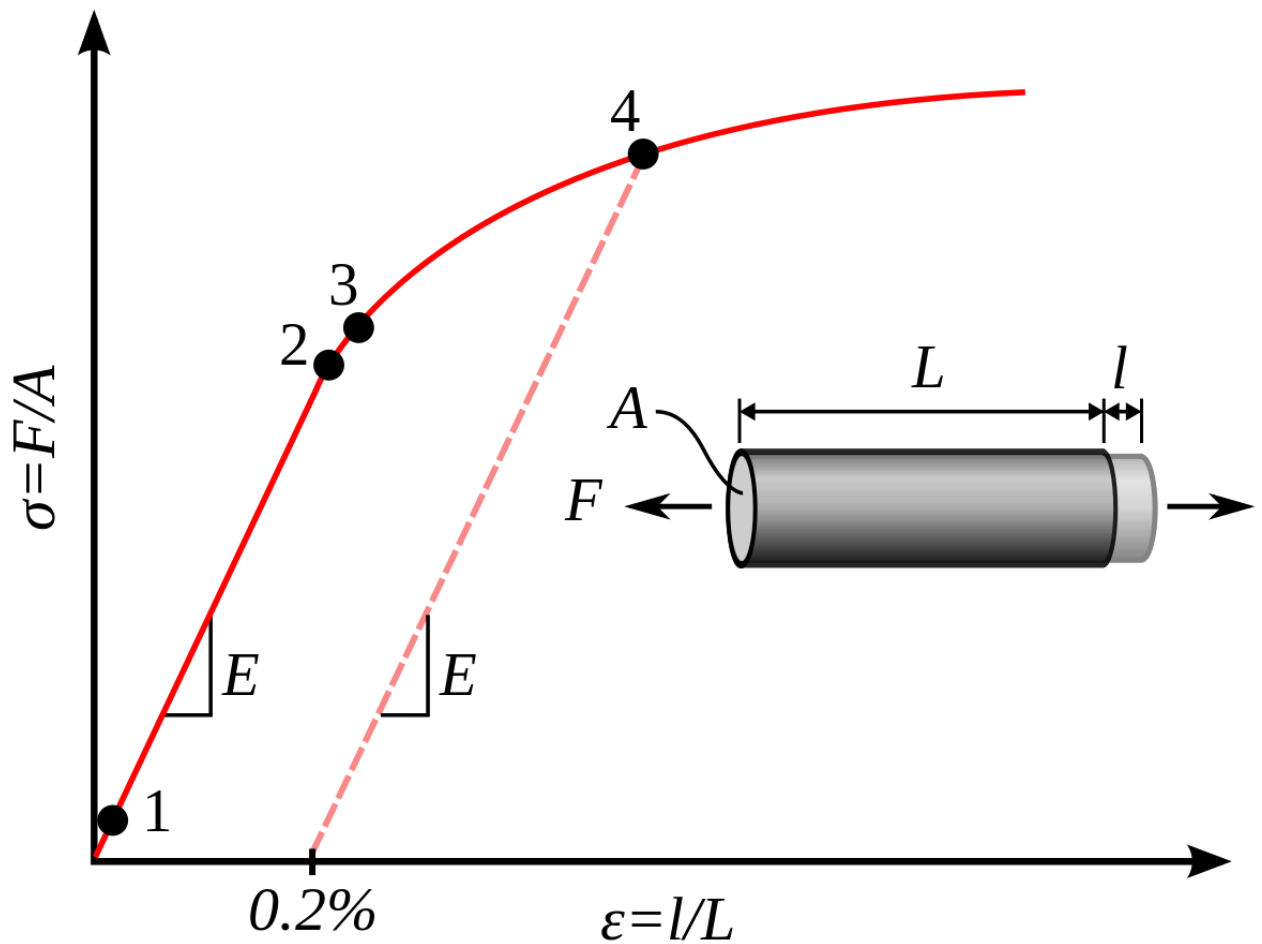


Рис 15. Типова діаграма розтягу алюмінієвих сплавів

1-2(Зона пропорційності); 1-3(зона пружності); 3-4(зона текучості)

В таблиці 4 не випадково наведено саме необхідну поглинуту густину потужності, оскільки коефіцієнт поглинання матеріалу має комплексну залежність. Він визначається характером поверхні, її шорсткістю, кутом падіння променя на заготовку, матеріалом заготовки, робочої довжини хвилі лазерного технологічного обладнання. Безпосередньо перед обробкою необхідно визначити його величину, щоб правильно задати параметри потужності випромінювача. Коефіцієнт поглинання може бути штучно заданим за рахунок нанесення на поверхню металу спеціального покриття.

Вихідний матеріал заготовки має на своїй поверхні оксидну плівку, масляні плями, пил та інші небажані забруднювачі. Тому перед обробкою необхідно підготувати поверхню, це зробить коефіцієнт поглинання однаковим по всій площі листа.

Процес лазерного формоутворення представляє собою складний та багатофакторний процес. Тому чітке визначення впливу кожного фактору необхідне для вдалого прогнозування результату обробки. Загалом кінцева просторова конфігурація виробу, при лазерному формоутворенні, обумовлена величиною, знаком та характером розподілу залишкових деформацій, які виникають в результаті локальної зміни об'єму матеріалу під час повторного циклу нагрівання – охолодження.

Для аналізу процесу лазерного формування фактори та параметри процесу доцільно розділити на три групи.

Перша група характеризує властивості матеріалу, до неї належать:

- поглинальна здатність матеріалу, яка визначає частку лазерної енергії, що поглинається матеріалом, спричиняючи його нагрівання;
- теплофізичні властивості матеріалу, які обумовлюють розподіл теплоти в об'ємі матеріалу зразка;
- початкова структура матеріалу зразка, що визначає вихідний напружено-деформований стан зразка та впливає на кінцевий характер та розподіл напружень в зоні обробки;
- фазовий склад матеріалу, впливає на характер та величину ініційованих напружень та визначає механізм термічного деформування;
- геометрія зразка, визначає момент інерції зразка, ступінь протидії деформуванню та можливість відведення тепла з зони обробки в холодні шари матеріалу.

До другої групи стосуються параметри лазерного випромінювання, а саме:

- потужність лазерного променя, визначає кількість енергії, що надходить до зразка;
- діаметр сфокусованого променя, визначає концентрацію лазерної енергії в локальній зоні обробки;

- розподіл інтенсивності в перерізі лазерного променя, обумовлює розподіл енергетичного вкладу в площині зони обробки;
- режим опромінення обумовлює характер внесення лазерної енергії в зону обробки. Може використовуватися неперервний або імпульсний режими. Також описує швидкість відносного переміщення лазерного променя та заготовки;

час дії, визначає величину енергетичного вкладу в зону обробки за час проходження лазерного променя через одиничну точку заготовки.

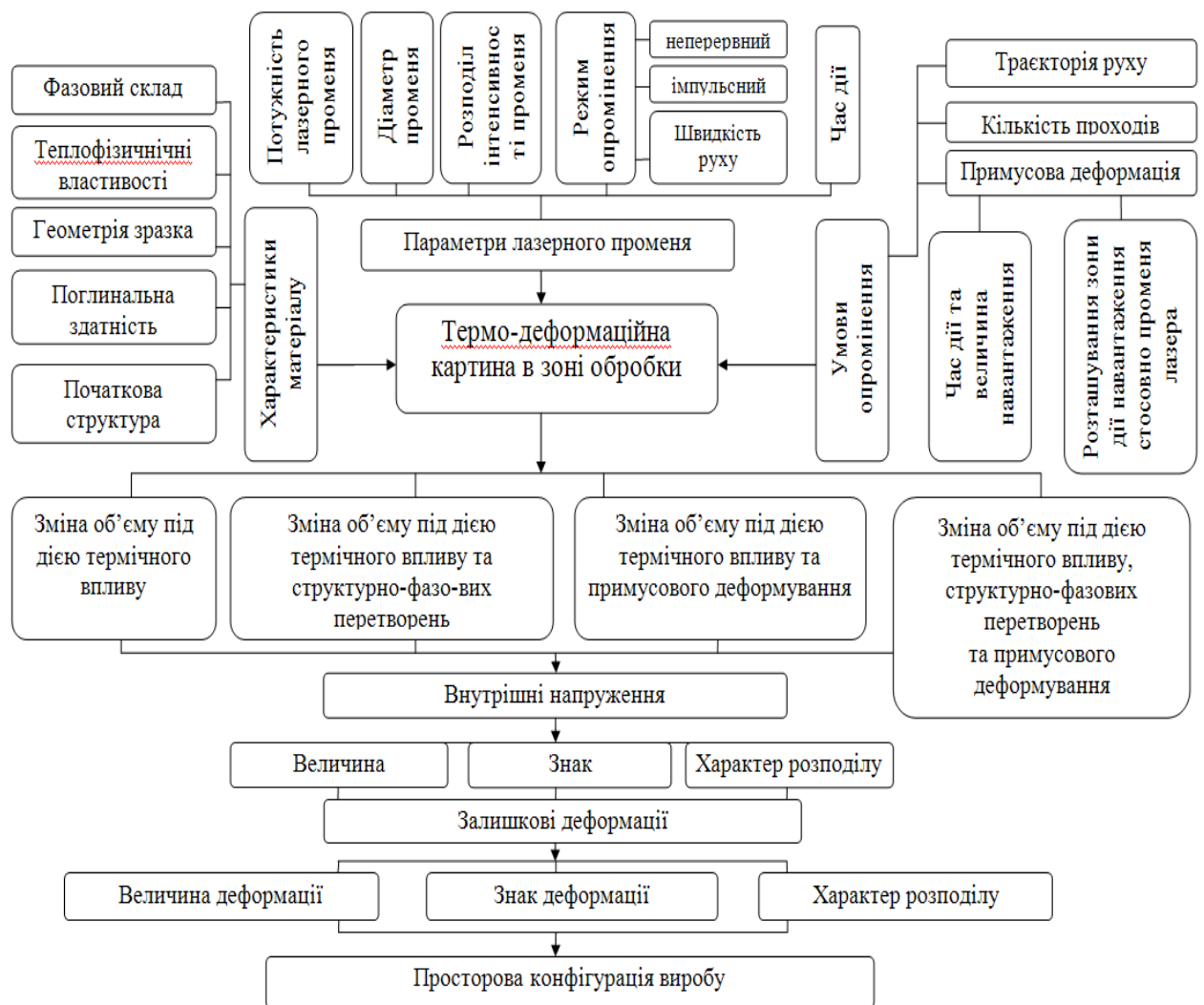


Рис.16. Фактори, що впливають на кінцеву конфігурацію виробу при лазерному формоутворенні.

До третьої групи належать фактори, що визначають умови опромінення:

- траєкторія руху променя, визначає зону оброблюваного матеріалу на якій створюються залишкові напруження та впливає на їх розподіл;
- кількість проходів, визначає кількість повторних циклів нагрівання та охолодження, підсилення величини деформації після одиничного проходу до потрібного значення;
- наявність силового примусового деформування, служить додатковим параметром для створення напружень потрібного знаку та величини. Силоне примусове деформування в свою чергу характеризується величиною навантаження, часом дії та розташуванням навантаження відносно зони лазерного нагрівання.

Сукупність та взаємодія зазначених факторів визначає термо-деформаційну картину в зоні обробки. Під час лазерного формування листового матеріалу, відбувається локальна зміна об'єму матеріалу в зоні обробки. Ця зміна об'єму, в залежності від параметрів та умов обробки, може відбуватися під дією термічного впливу; термічного впливу та структурно-фазових перетворень; термічного впливу та примусового деформування; а також у випадку поєднання дії термічного впливу, структурно-фазових перетворень та примусового деформування. Локальна зміна об'єму викликає появу внутрішніх напружень, які визначаються величиною, знаком та характером розподілу. Утворені напруження релаксують за рахунок залишкової пластичної деформації, яка описується величиною, знаком та характером розподілу. Величина, знак та характер розподілу залишкових деформацій, в свою чергу, визначають кінцеву конфігурацію виробу.

Для керування процесом лазерного формоутворення використовуються фактори з другої та третьої груп. Отже, факторами для поточного керування процесом лазерного формування просторових об'єктів з листового матеріалу є: діаметр лазерного променя, розподіл інтенсивності в перерізі лазерного променя, швидкість його руху, траєкторія руху променя, кількістю проходів лазерного

променя за цією траєкторією. В якості додаткового параметра можна використовувати зовнішнє примусове деформування.

Встановлення зв'язків між наведеними факторами і параметрами, їх формалізація дозволять керувати процесом лазерного формоутворення складних листових виробів.

Методика дослідження процесу формоутворення пластин та дисків.

В залежності від властивостей оброблюваних металів, процеси, що протікають при повторних циклах локального нагрівання-охолодження, відрізняються, відрізняється також механізм та величина деформації. Так матеріали, в яких при нагріванні-охолодженні не відбуваються поліморфні перетворення, деформуються в результаті локальної зміни об'єму під дією градієнта температур. Натомість, в матеріалах схильних до поліморфних перетворень, зміна об'єму виникає також і під дією цих перетворень. При чому, ці два механізми конкурують в процесі циклу нагрівання-охолодження. Відповідно, результати обробки зразків, з матеріалів в яких відбуваються поліморфні перетворення і в яких ці перетворення не відбуваються, будуть різні, при інших сталих параметрах. Тому, для дослідження лазерного формоутворення листових матеріалів, було обрано матеріали з яскраво вираженим поліморфним перетворенням (вуглецева сталь 65Г), та такі де структурно-фазові перетворення не відбуваються (корозійностійка сталь аустенітного класу 12Х18Н10Т).

Отже, для проведення досліджень були підготовані зразки вуглецевої сталі 65Г та нержавіючої сталі аустенітного класу 12Х18Н10Т. Розміри зразків становили: довжина – 100мм., ширина – 50мм, товщина – 0.5мм., 1.0мм., 1.5мм.,

2.0мм. На поверхню зразка наносилося покриття з оксиду цинку, для зменшення втрат енергії променя на відбивання від поверхні зразка.

Зразок закріплювався консольно в струбцині таким чином, щоб лазерний промінь падав на поверхню зразка перпендикулярно. Вісь лазерного променя позиціонувалася на відстані 10мм. від місця закріплення. На відстані 10мм. від вільного краю зразка, встановлювався індикатор переміщення (рис.17), для фіксування відносного переміщення вільного краю зразка. Напрямок прямолінійного лазерного проходу задавався перпендикулярним до довшої (100мм.) сторони зразка. Здійснювалися почергові лазерні проходи та фіксувалася величина відносного переміщення вільного краю зразка за кожен прохід. При чому, кожен наступний прохід співпадав з попереднім за розміщенням на зразку.

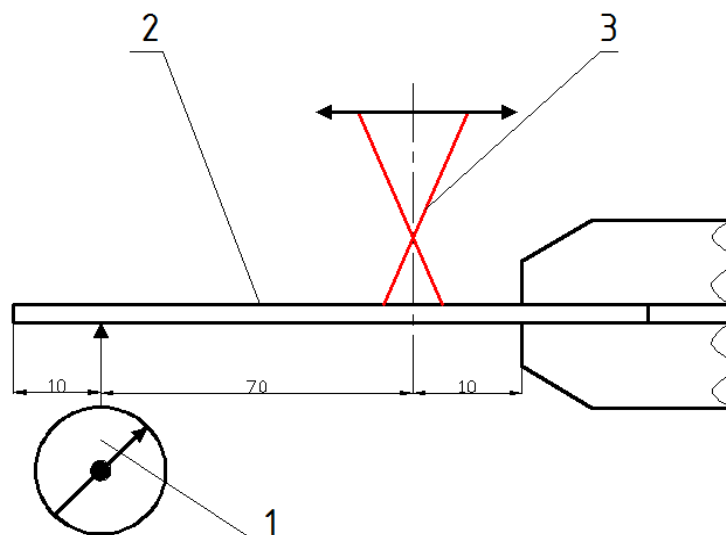
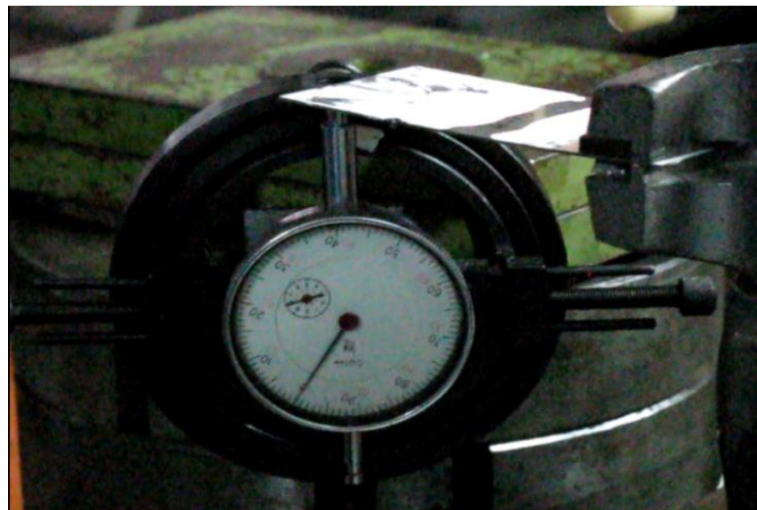


Рис. 17. Визначення величини формувальної деформації: 1- індикатор переміщення, 2 – зразок, 3- лазерний промінь

Для встановлення залежностей між величиною деформації зразків з різного матеріалу, різної товщини та параметрами опромінення, зразки оброблялися за різних режимів. Проводилася варіація діаметру зони фокусування та швидкості переміщення лазерного променя по заготовці, змінювалася потужність лазерного променя та розподіл інтенсивності в його перерізі. Встановлювалися оптимальні параметри обробки.

Оскільки, для формування конструкцій складної форми, не достатньо проводити опромінення зразків за прямолінійною траєкторією, то існує необхідність вивчення процесу деформування матеріалу за складними криволінійними формами лазерних проходів. Видається доцільним проводити таке дослідження на основі обробки лазерним променем, за складними траєкторіями, металевих дисків рис.18 – 21.

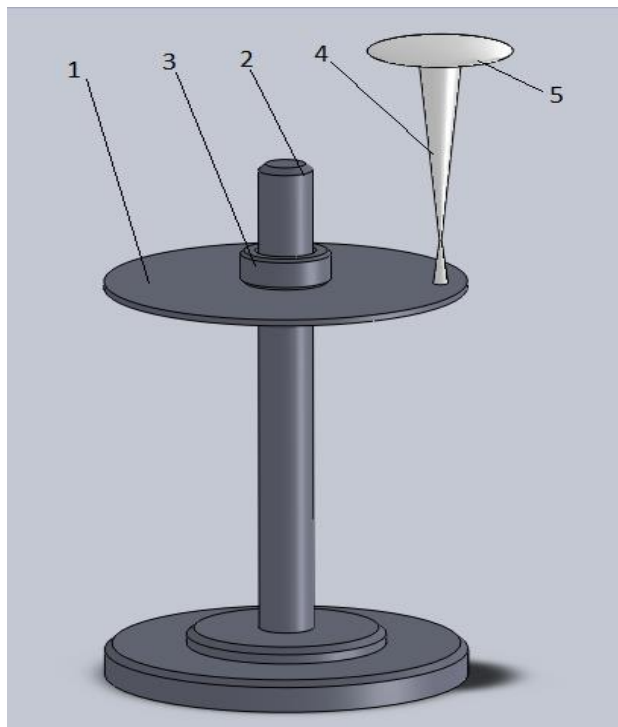
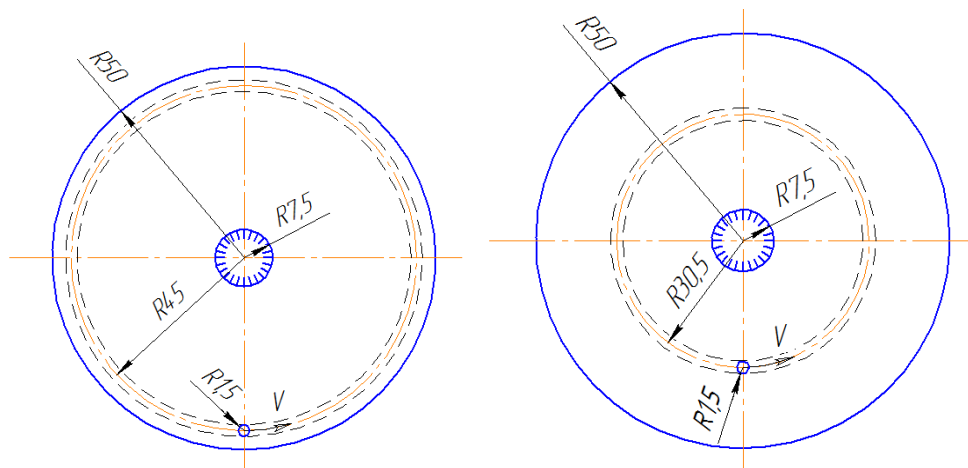


Рис. 18.Схема лазерного формоутворення дисків: 1 – зразок, 2 – стійка, 3 – фіксатор, 4 – лазерний промінь, 5 – лінза.

Досліджувалися металеві диски товщиною 0.5мм., 1.0мм., 1.5мм., 2.0мм., діаметр дисків – 100мм. Диски мали центральний отвір діаметром 15мм. за допомогою якого проводилося кріплення та позиціонування диска перед обробкою. На опромінювані зони, перед обробкою, наносилося поглинальне покриття з оксиду цинку. Під час обробки варіювалися режими: виставлялася різна швидкість руху теплового джерела та різний діаметр зони фокусування, чим регулювалася величина теплового вкладу в зону обробки. Окрім зміни режимів змінювалася також і траєкторія руху лазерного променя поверхнею зразка. Дослідження лазерного формування дисків проводилося в кілька етапів.

На першому етапі проводилося дослідження величини та розподілу деформації при опроміненні зразка за траєкторії: концентричне коло. Проводилося одиничне а потім повторне опромінення за тією ж траєкторією з фіксацією величини та характеру деформування зразка. На першому етапі діаметр кола лазерного проходу був на 10 мм. менший за діаметр диска, далі він зменшувався і становив 61мм, після чого максимально наближався до діаметру внутрішнього отвору диска. Центр кола лазерного проходу співпадав з центром кола диску.



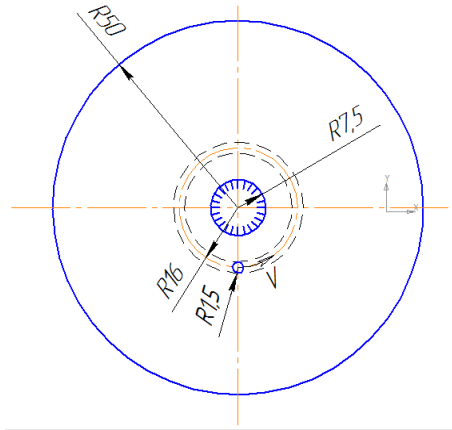


Рис. 19. Траєкторії руху променя при обробці дисків одиночними колами

На наступному етапі дослідження, траєкторією руху променя були концентричні кола. При чому на частині зразків опромінення починалося з кола найменшого діаметру з послідовним збільшенням (на 10мм.) діаметру кіл; а на іншій частині зразків опромінення починалося від периферії до центру зразка з послідовним зменшенням діаметру кіл. Центри кіл лазерних проходів також співпадали з центром кола диску. Величина та характер деформації фіксувалися, а результати опромінення порівнювалися між собою.

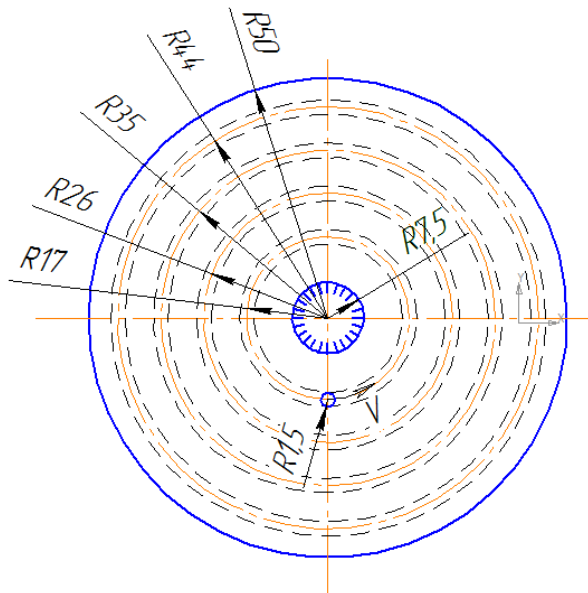


Рис. 20. Схема обробки дисків концентричними колами.

Далі диски опромінювалися по спіралі. Частина зразків опромінювалася починаючи від центра, а інша – починаючи з периферії. При цьому, фіксувалися

величина та характер деформації, а результати порівнювалися між собою, та з результатами попередніх етапів.

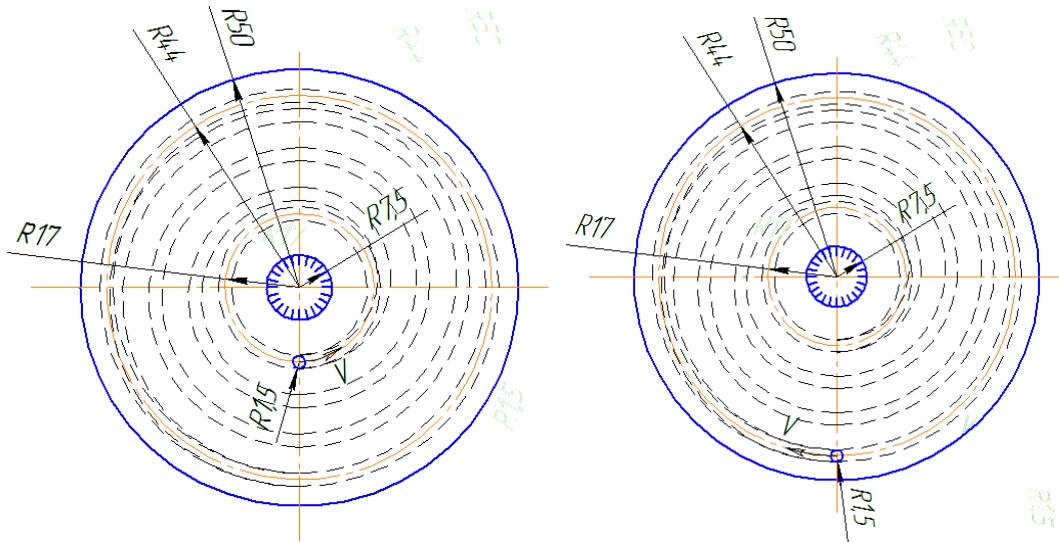


Рис. 21. Схема обробки дисків за спіральними траєкторіями.

Окрім того, за кільцевої траєкторії опромінення, частина зразків під час обробки оберталися з частотою 17,69 об./хв., інші з частотою 11000 об./хв.. При цьому, за діаметру променю 3мм., час опромінення окремої точки зразка становив 0,036с. та $0,579 \cdot 10^{-6}$ с відповідно. Частота обертання 11000 об./хв. Використовувалася для моделювання рівномірного кільцевого нагрівання диску. Після виконання обробки результати порівнювалися.

Визначення величини деформації.

Під час опромінення зразка, в матеріалі виникають внутрішні напруження, обумовленні енергетичним вкладом теплового джерела та процесами, що при цьому протікають. Ці напруження компенсуються за рахунок пластичного деформування зразка. При цьому, вільні не закріплені краї зразка переміщуються відносно закріпленого краю. Визначивши величину цього переміщення можна оцінити величину деформації. Величина переміщення фіксувалася за допомогою індикатора переміщень з точністю 0,01мм. Після кожного проходу індикатор підлаштовувався: вимірювальна ніжка ставилася перпендикулярно до зразка, шкала виставлялася на нуль.

У випадку дослідження деформування пластин, величина деформації представлялася у вигляді кута згинання пластини і визначалася наступним чином:

- Індикатор переміщення показує величину катета протилежного шуканому куту, на прямокутному трикутнику з гіпотенузою 70мм.
- Обраховується синус шуканого кута.
- Знаходиться значення кута в радіанах.
- Значення кута в радіанах переводиться в градуси. Отримуємо значення кута згинання за кожен прохід.
- Значення кутів згинання за одиничний прохід сумуються – отримується сумарний кут згинання.

У випадку дослідження формування дисків, мову слід вести про відхилення від площинності, та вимірювати його від базової платини.

Роботи з визначення результатів досліджень, які велись на кафедрі лазерної техніки та фізико-технічних технологій професорами Глоловком Л.Ф, Лутаєм А.М., Кагляком О.Д. дозволили прийти до наступних закономірностей:

Диски, що формуються за один прохід променя по спіралі від периферії до центру не здатні прийняти тарілчастої форми внаслідок дії диску як ребра жорсткості при спробі створити в них випинаючих напружень.

Справа в тому що оточуючий теплове джерело холодний матеріал, який слугує його термопластичному стисканню при нагріві починає заважати прийняти заготовці форму тарілка або гіперболоїда внаслідок своєї пружності.

З кожним проходом по витку спіралі, в поверхні диску формуються напруження, що прагнуть стягнути його в тарілчасту форму. Це неможливо так як початкова довжина дуги круглої заготовки значно більша за ту, яку необхідно прийняти ободу для утворення просторової поверхні. Через це, стягуючі напруження починають діяти на стиск в периферії вздовж концентричних кілець в площині диску. Рис.22

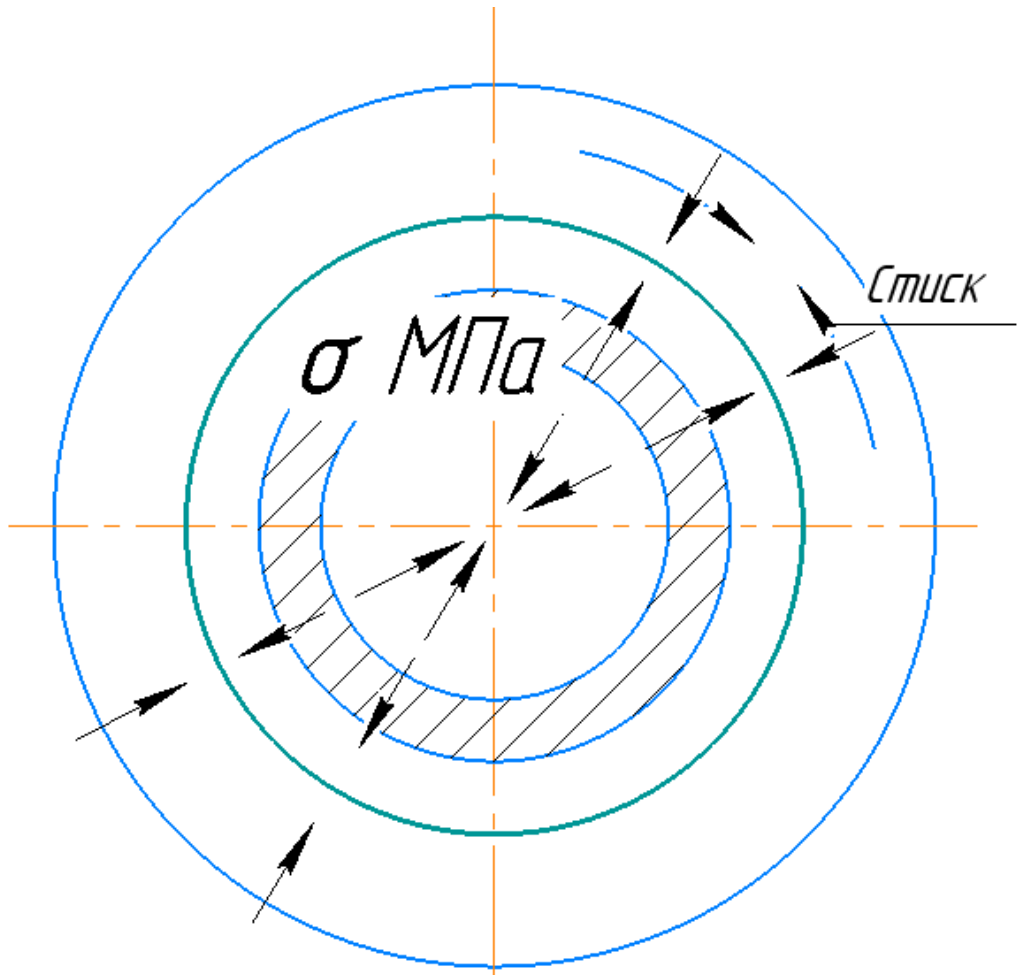


Рис. 22. Утворення напружень в дисковій заготовці.

Потовщеною лінією показана траєкторія руху променя по заготовці. В місці де він пройшов створюються стягуючі напруження, а наслідком круглої форми заготовки та доріжки прогріву є те, що зовнішня частина диску зазнає стискаючих напружень, згідно до узагальненого закону Гука. А центральна заштрихована частина отримує напруження розтягу. З кожним витком спіралі, ці напруження сумуються, і в результаті зростають до такої величини, що при подальшому наближенні до центру матеріал не чинить обмежень на нагріту зону в плані недопущення вільних розширень.

Більше того, якщо продовжити чинити опромінення, при тепловій дії лазерного променя в тій зоні де сформовано великі напруження розтягу, матеріал втратить здатність не піддаватись деформації. Ті напруження що розтягували центральну частину призведуть до термопластичної деформації

Потім настане момент, коли процес накопичення деформацій знову завадить подальшому витягуванню заготовки, це також стане сигналом до того, що потрібно повернутись в початкове положення на периферію, та почати наступний прохід термопластичної лазерної витяжки. (Рис.24)

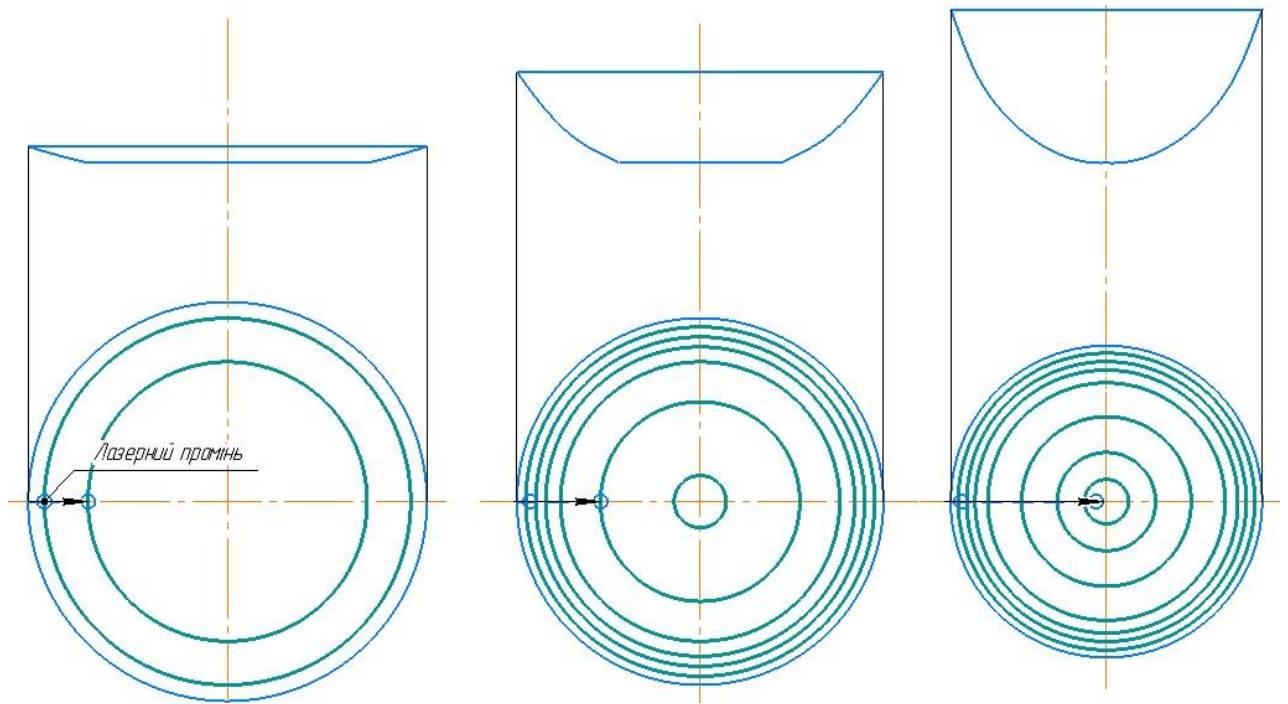


Рис.24 Формування тарілкового обтікача.

За схожою схемою можна сформувати криволінійне тіло обертання з трубчастої круглої заготовки. Починаючи з вільного кінця труби робиться лазерний прохід по внутрішній поверхні трубної заготовки, що в свою чергу тягне за собою завороту її в середину труби, але так само як і у випадку з дисковою заготовкою, напруження стиску на зрізі труби зі сторони початку проходу виникнуть напруження стиску. Вони є наслідком дії усадки тих частин заготовки, які знаходяться далі від зрізу труби, і зазнають дії лазера.

Тому коли формування радіуса, що прагне зійтись на осі заготовки припиниться, потрібно повернути фокусуючий елемент верстата в початкове положення на почати прохід заново. (Рис.25)

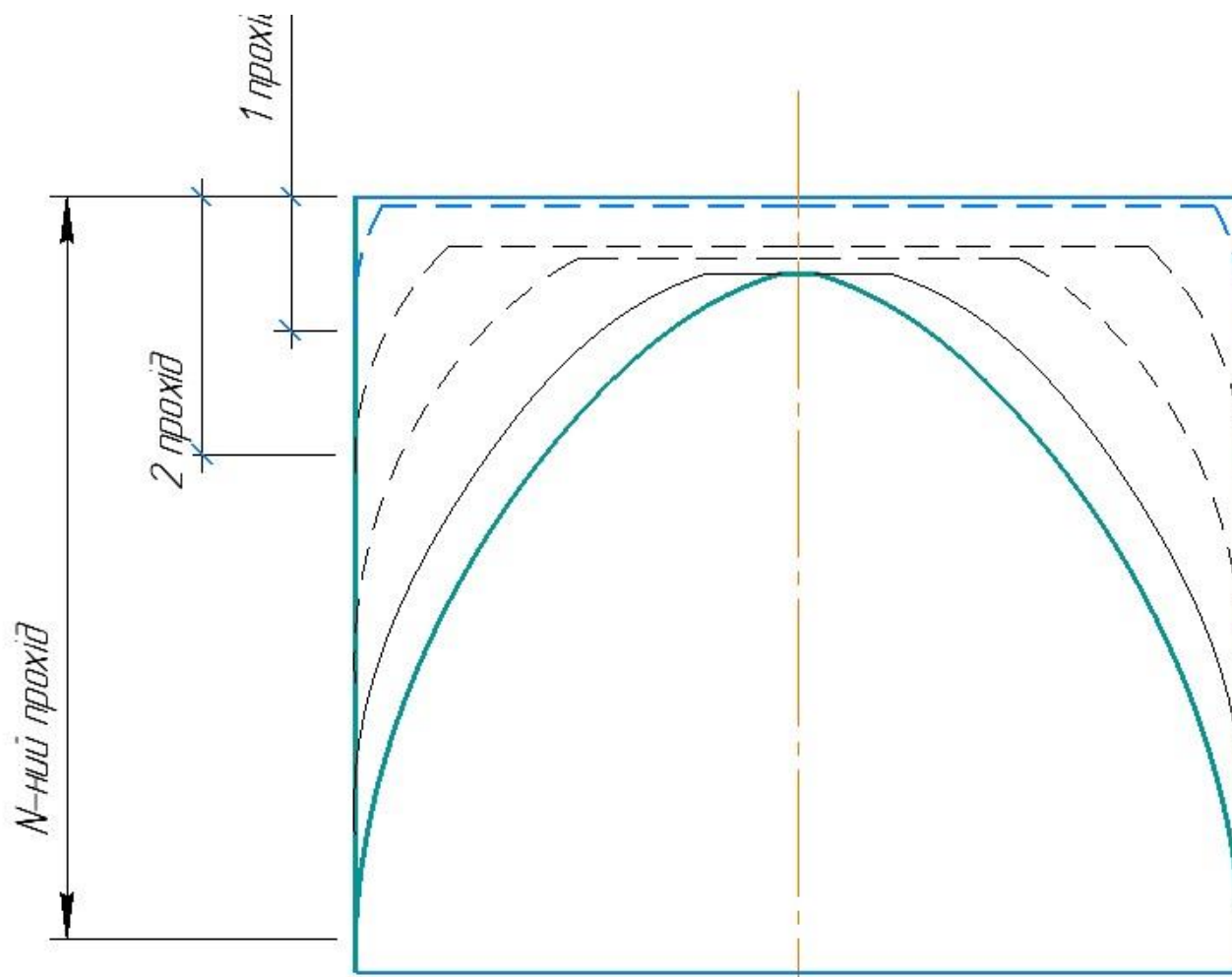


Рис.25 утворення обтікача з трубної заготовки.

Після термопластичної деформації в точці матеріалу, стягуючі напруження які діють в ній, прагнуть зігнути заготовку в конічну поверхню, із вершиною, що співпадає з точкою дії лазерного теплового джерела на заготовку, тому керуючи формою траєкторії руху можна досягти бажаних геометричних характеристик просторової поверхні аеро або гідродинамічної деталі.

На рисунку 26 та 27 показано яких форм можна досягнути керуючи формою траєкторії руху теплового джерела.

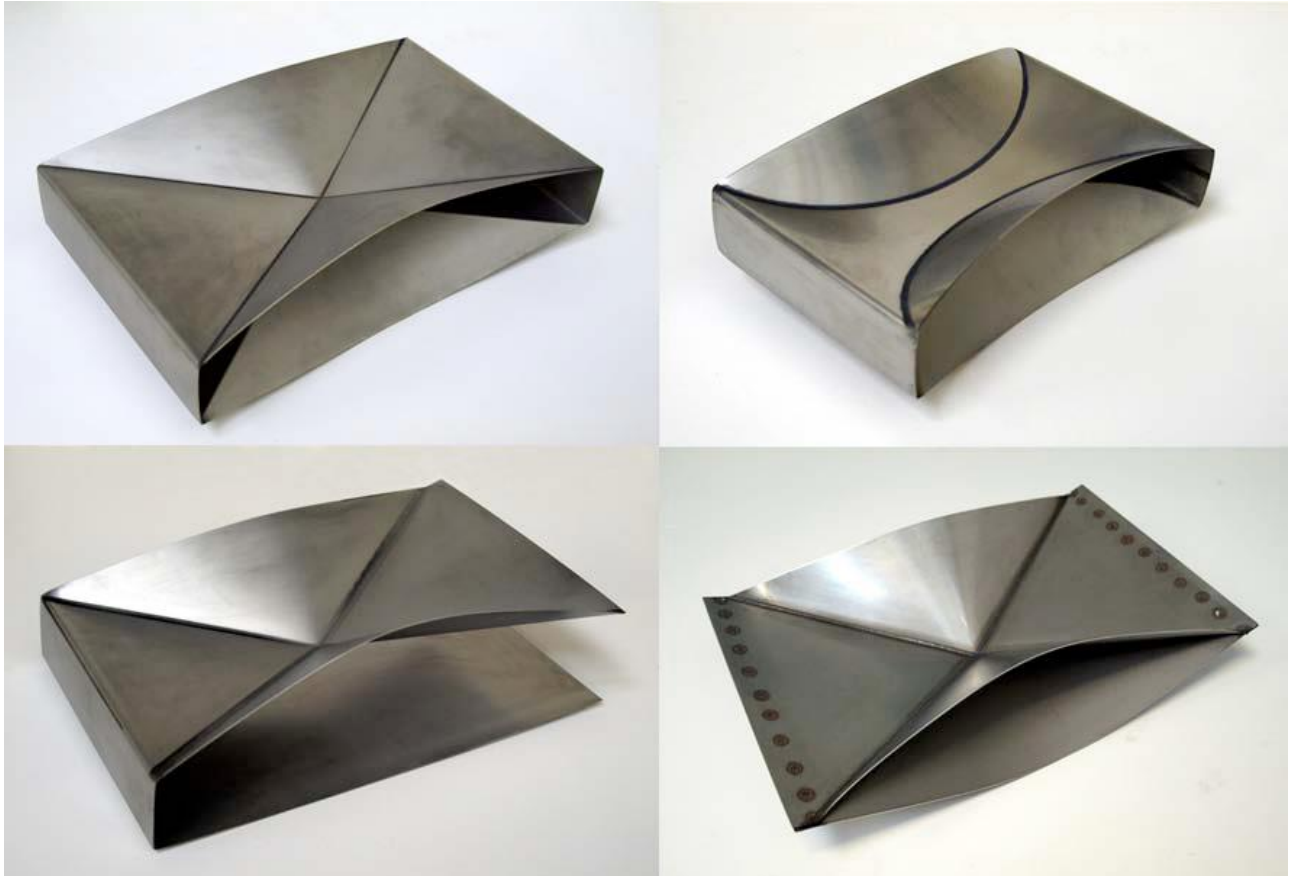


Рис.26 Утворення складної конфігурації зразків шляхом керування траєкторією.

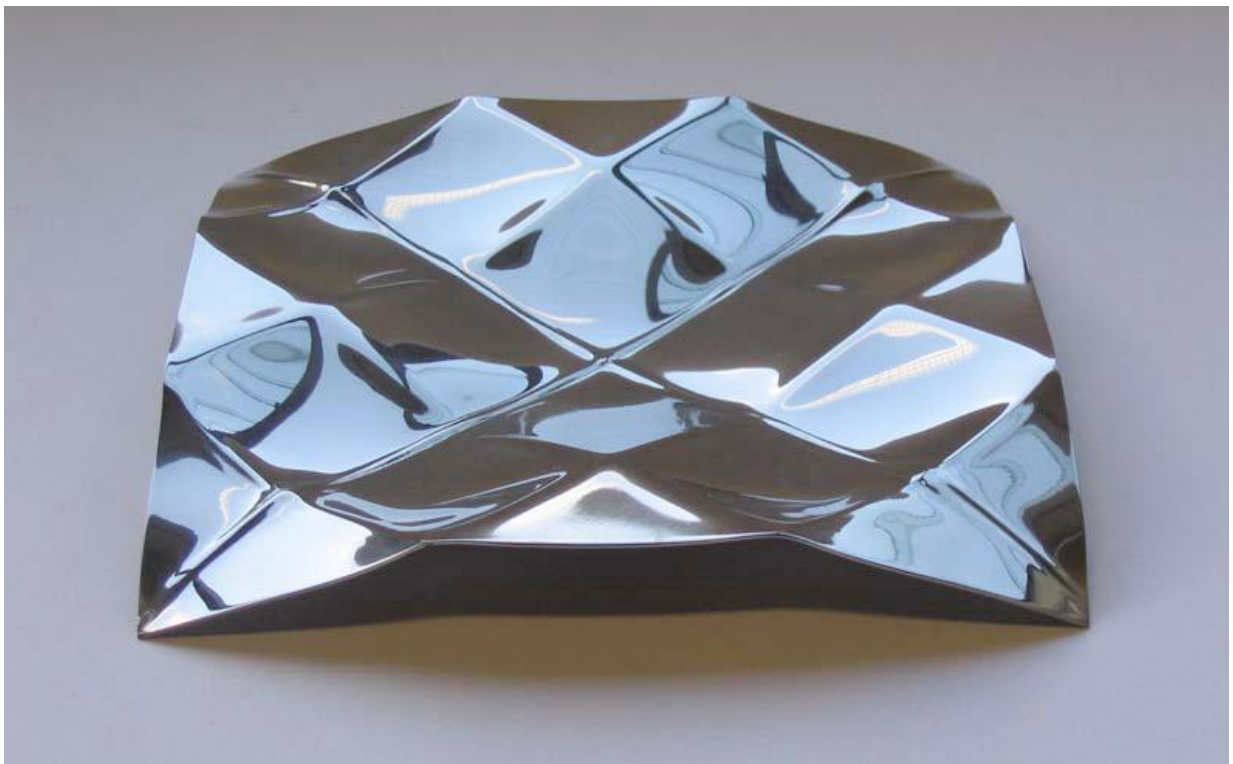


Рис.27

Авіа та суднобудуванні існує багато форм, які представляють собою складні тривимірні математичні поверхні. Розрахувавши перерозподіл матеріалу по об'єму майбутньої деталі можна визначити:

- В яких місцях чинити дію лазерним променем для створення згинаючого силового фактора;
- Де і в який момент обробки провести релаксаційний прохід, для уникнення короблення листової деталі, та забезпечення нормальних умов для подальшого використання процесу термопластичної деформації.

Це дасть змогу формувати обшивку для: крил, стабілізаторів, елементів механізації крил, обтічників гвинтів, килів, труб та патрубків імPELLерів.

На рисунках 28-30 показано деталі, та форми поверхонь, які можна сформувати:



Рис.28. Гвинт катера з анти-кавітаційними приливами

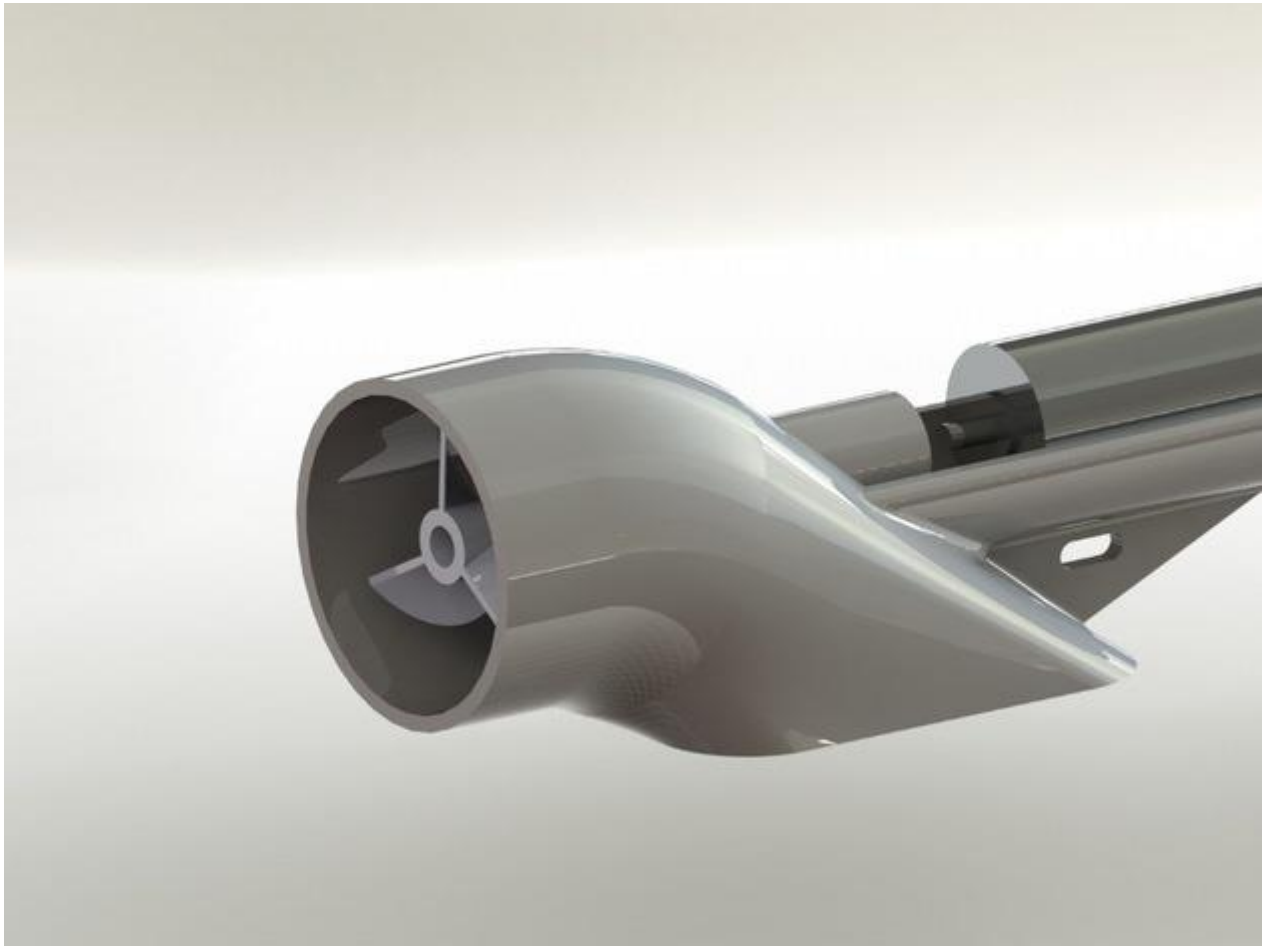


Рис.29. ИмPELLерный патрубок катера.



Рис.30 Опорні гідродинамічні поверхні катера.

Оцінювання характеру залишкових напружень.

Для оцінювання характеру залишкових напружень використовувалися засоби дифрактографії. Знімання дифрактограм проводились на рентгенівському дифрактометрі ДРОН - 4. в кобальтовому не фільтрованому випроміненні.

На напружено-деформований стан, особливо у вуглецевих сталях, суттєвий вплив справляють поліморфні перетворення та їх перебіг. Важливим параметром для оцінки цього впливу є визначення кількості залишкового аустеніту.

Кількість залишкового аустеніту ($\%A_{\text{зал}}$) визначалася методом гомологічних пар, концентрацію вуглецю в мартенситі (C_M) - за міждублетною відстанню виділених синглетів (002) и (020)(200).

Якщо врахувати, що питомий об'єм мартенситу на $\approx 1\%$ більший за питомий об'єм аустеніту, то для величини залишкових напружень ($\sigma_{\text{ост}}$) справедлива оцінка $\sigma_{\text{ост}} = (E/(1-\mu))\epsilon$ (E - модуль Юнга, μ – коефіцієнт Пуассона, ϵ - лінійна деформація).

Стійкість металевих конструкцій отриманих лазерним деформуванням.

В процесі експлуатації сформовані конструкції несуть робочі навантаження різного знаку та величини. Здатність конструкції зберігати сталу форму та положення під час експлуатації, визначає її експлуатаційні характеристики. Зазвичай, для збільшення стійкості та жорсткості конструкції з листового матеріалу, використовують ребра жорсткості або ж використовують листовий матеріал більшої товщини. Якщо вдасться, за допомогою зміни способу формування, збільшити стійкість та жорсткість конструкції, то це дозволить зменшити витрати матеріалу та суттєво зменшити масу готової конструкції. Що, в свою чергу, дозволить економити експлуатаційні потужності.

Для визначення стійкості сформованих лазером конструкцій та її порівняння зі стійкістю конструкцій сформованих класичними способом, відбиралися зразки у вигляді пластин зігнутих на кут 90° тотожні за розмірами та матеріалом (сталь 65Г та сталь 12Х18Н10Т) але відмінні за способом формування. Ці зразки закріплювалися в струбцині за один край, а до вільного краю прикладалося навантаження спрямоване на розгинання сформованого кута. Для концентрації зусилля розгинання у вершині кута, поверхні зразка, прилеглі до кута, затискалися допоміжними пластинами. Під час прикладання навантаження вимірювалася (за вимірювальною шкалою, °) повна деформація зразка, після зняття навантаження, вимірювалася залишкова деформація. Далі навантаження збільшувалося і вимірювання продовжувалося. Навантаження збільшувалося дискретно від величини 0,1кг. з кроком 0,1кг.. Таким чином перевірялася стійкість сформованої конструкції до розгинання, та її порівняння зі стійкістю конструкцій сформованих класичними способом (рис.31 а).

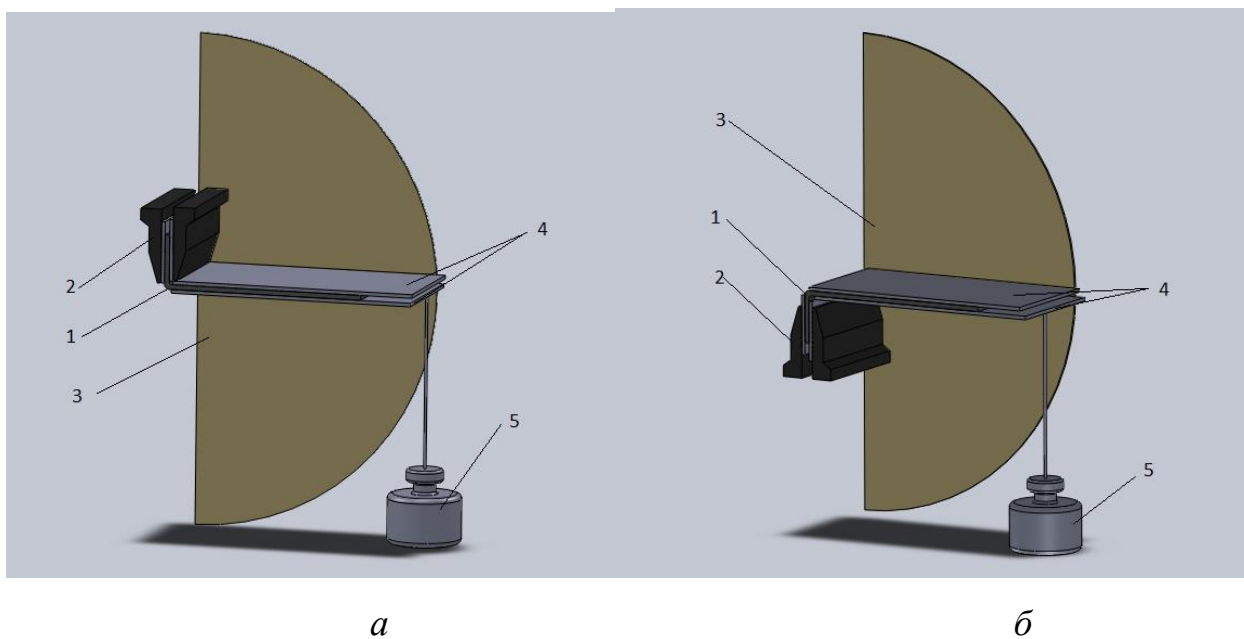


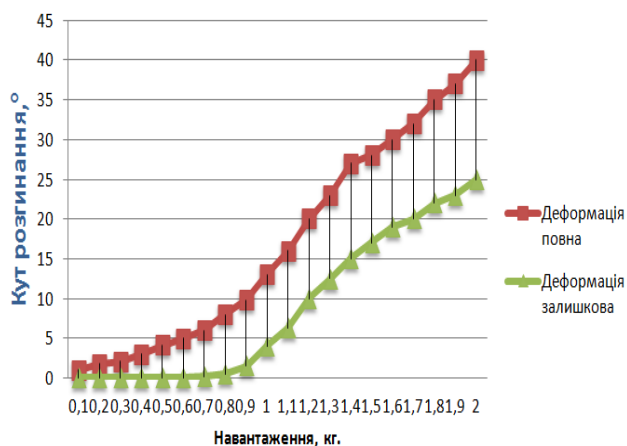
Рис. 31 Схема оцінки стійкості сформованих конструкцій: а – до розгинання, б – до надмірного згинання. 1 – зразок, 2 – струбцина, 3 – вимірювальна шкала, 4 фіксуючі пластини, 5 – змінний вантаж.

Для визначення стійкості сформованих конструкцій до надмірного згинання, відбиралися зразки аналогічні до попереднього випадку.

Навантаження прикладалося у напрямку збільшення кута згинання. Так само фіксувалися повна та залишкова деформації. Навантаження змінювалося аналогічно до попереднього випадку (рис. 31 б).

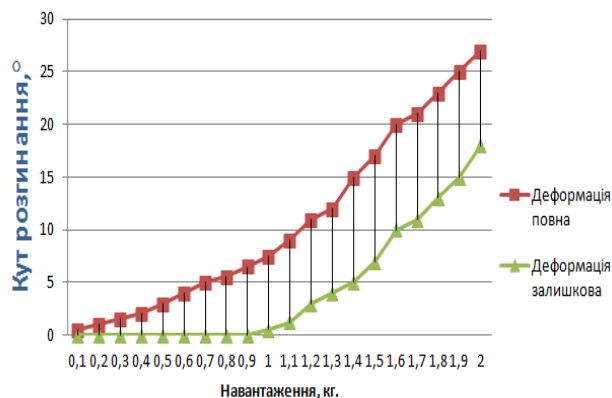
Аналогічні операції проводимо зі зразками з сталі

Нержавіюча сталь, пластично
деформована до кута 90° $S=0,5\text{мм}$



12X18H10T

Нержавіюча сталь , деформована за
допомогою лазера до кута 90° $S=0,5\text{ мм}$

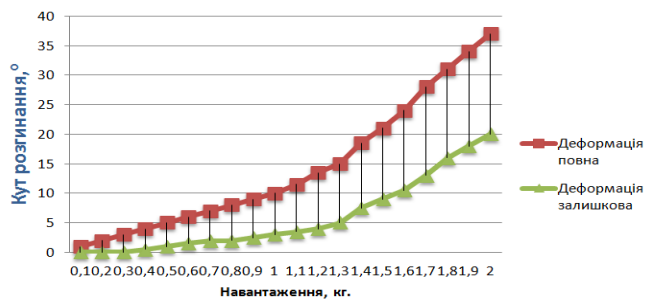


а

б

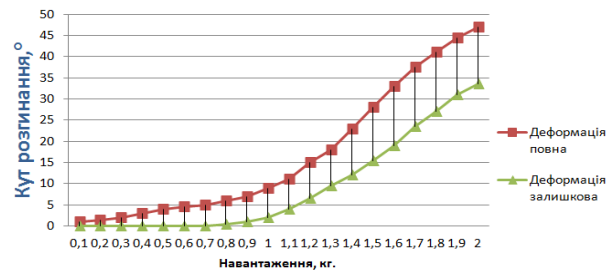
Повна та залишкова деформації зразків зі сталі 12X18H10T, при дослідженні на розгинання: а – сформований обробкою тиском, б – утворений лазерним формуванням

Нержавіюча сталь, пластично деформована до кута 90° $S=0,5\text{мм}$



а

Нержавіюча сталь, деформована за допомогою лазера до кута 90° $S=0,5\text{мм}$



б

Повна та залишкова деформації зразків зі сталі 12Х18Н10Т, при дослідженні на подальше згинання: а – сформований обробкою тиском, б – утворений лазерним формуванням

Поведінка сформованих конструкції в умовах робочих теплових навантажень.

Сформована конструкція в процесі експлуатації може витримувати не лише силові навантаження, але й піддаватися впливу підвищених температур, або ж комбінації силового та теплового навантаження. Тому визначення сталості форми конструкції під дією теплових навантажень та збереження характеристик конструкції (жорсткість, стійкість) після припинення дії теплового навантаження є дуже важливим.

Теплові навантаження на сформовані конструкції в процесі експлуатації можуть мати циклічний характер (повторні цикли нагрівання та охолодження), під їх дією в деформованій зоні зразків може відбуватися перерозподіл внутрішніх напружень та зміна форми конструкції. Доцільно дослідити сталість, при об'ємному нагріванні-охолодженні, конструкцій сформованих лазером у порівнянні з конструкціями сформованими класичним способом. Для цього відбираємо зразки з вуглецевої сталі 65Г та нержавіючої сталі 12Х18Н10Т половина з яких сформована лазерним способом, а друга половина обробкою тиском. Зразки з одного матеріалу (наприклад з сталі 65Г) попарно: сформований

лазером + сформований обробкою тиском поміщаються у термічну піч, де проводиться нагрівання до температури низького відпуску (200 °C). Після нагрівання та охолодження виявляється наявність зміни форми зразка, та фіксується її величина. Наступна пара зразків нагрівається до температури середнього відпуску (400 °C), охолоджується, після чого знову фіксується наявність та, за наявності, величина зміни форми. Наступна пара зразків піддається високому відпуску (600 °C), з подальшим охолодженням та вимірюванням. Остання пара зразків піддається відпалу з подальшими аналогічними замірами. Проводиться порівняння результатів термічного впливу між зразками сформованими різними методами.

Вибір технологічного обладнання

Лазерне формоутворення представляє з себе різновид лазерної повеневої обробки, який може проводитися за допомогою всіх видів лазерів характерних для операцій лазерної поверхневої обробки. В даний час, в технологічних операціях лазерної обробки, використовуються лазери різних видів та конструкцій.

В залежності від типу виконуваних операцій та матеріалів, з якими доводиться працювати, застосовують лазери різними робочими довжинами хвиль випромінювання, різними режимами випромінювання (неперервний, імпульсно-періодичний, режим одиничних імпульсів) та різними потужностями. Найбільш розповсюдженими на виробництвах є лазери на ітрій-алюміній-гранатовому кристалі, легovanому неодимом (ІАГ:Nd) та вуглекислотні (CO₂) лазери. Останні працюють у режимі неперервного випромінювання та використовуються для газо-лазерної різки, поверхневого гартування металів, обробки пластмас. Газові лазери можуть мати дуже велику потужність до 100 кВт, але досягти таких рівнів вкрай важко, до того ж у лазерів цього типу досить малий коефіцієнт корисної дії $\eta=10-20\%$ у порівнянні з (ІАГ:Nd) $\eta=30-45\%$ при діодній накачці.

У освітлювальній камері твердотільного лазера розміщуються лампа накачування і активне тіло, яке представляє собою стрижень з неодимового скла (Nd-скло), рубіна або алюмо-ітрієвого гранату, легованого ітербієм (Yb-YAG) або неодимом (Nd-YAG). Лампа накачування створює потужні світлові спалахи для збудження атомів активного тіла. Форма освітлювальної камери та її внутрішня поверхня створені таким чином, щоб пере відбивати якомога більшу кількість світлової енергії в стрижень активного середовища. По торцях стрижня розташовані дзеркала - суцільне та частково прозоре, які утворюють резонатор. Лазерний промінь посилюється в результаті багаторазових відбиттів від дзеркал та численної кількості проходів всередині активного тіла, і виходить через частково прозоре дзеркало. Твердотільні лазери можуть забезпечувати як безперервний, так і імпульсний режим випромінювання.

Твердотільний лазер з діодним накачуванням - різновид твердотільного лазера, в якому в якості джерела енергії накачування використовується лазерний діод, лінійка лазерних діодів або діодна матриця. Твердотільний лазер з діодним накачуванням характеризуються високою ефективністю і компактністю порівняно з газовими та іншими твердотільними лазерами. Джерелом накачування є потужний інфрачервоний лазерний діод (від 100 мВт до декількох ват) з довжиною хвилі 808 нм. Цим діодом накачується кристал алюмо-ітрієвого гранату. Кристал випромінює на довжині хвилі 1064 нм., що відповідає ближній інфрачервоній зоні.

У газових лазерах в якості активного тіла застосовується суміш газів, зазвичай вуглекислого газу, азоту та гелію. У лазерах з поздовжнім прокачуванням газової суміші, що надходять з балонів, прокачується за допомогою насоса через газорозрядну трубку. Електричний розряд між електродами, підключеними до джерела живлення, використовується для енергетичного збудження газу. По торцях трубки розміщені відбивне і напівпрозоре дзеркала, також для виведення пучка з випромінювача може використовуватись нестійкий резонатор. Більш компактними і потужними є

лазери з поперечним прокачуванням газової суміші. Їх середня потужність може досягати 20 кВт і вище.

Досить ефективні щілинні CO₂-лазери. Вони мають ще менші габарити, а потужність їх випромінювання зазвичай становить 600-8000 Вт. Режим випромінювання - від безперервного до частотно-імпульсного. У щілинному лазері застосовується поперечне високочастотне накачування активного середовища (з частотою від десятків МГц до декількох ГГц), яке створює ємнісний високочастотний тліючий розряд. Завдяки такому накачуванню збільшується стійкість і однорідність горіння розряду, а величина Фарадеевого темного простору зводиться до мінімуму. Щілина між електродами становить 1-5 мм, що сприяє ефективному відведенню тепла від активного середовища.

Лазерний діод - напівпровідниковий лазер, побудований на базі діода. Його робота заснована на виникненні інверсії населеності в області р-п переходу при інжекції носіїв заряду. Коли на анод звичайного діода подається позитивний потенціал, то говорять, що діод зміщений у прямому напрямку. При цьому дірки з р-області інжектуються в п-область переходу, а електрони з п-області інжектуються в р-область напівпровідника. Якщо електрон і дірка виявляються «близько» (на відстані, коли можливе тунелювання), то вони утворюють квантову систему, що подібна своїми властивостями до збудженого атома активного середовища в звичайному твердотільному лазері. Під дією фотона, що поширюється в площині р-п переходу, електрон та дірка можуть вимушено рекомбінувати з виділенням енергії у вигляді фотона певної довжини хвилі (в силу збереження енергії) і в тому ж напрямку поширення. (в силу збереження імпульсу).

Волоконний лазер - лазер, активне середовище і, можливо, резонатор якого є елементами оптичного волокна. При повній волоконній реалізації такий лазер називається суцільно-волоконним, при комбінованому використанні волоконних та інших елементів в конструкції лазера він називається волоконно-дискретним чи гібридним. Основними перевагами волоконних лазерів є висока оптична

якість випромінювання, невеликі габарити і високе значення ККД. Волоконний лазер складається з модуля накачування (як правило, широкополосні світлодіоди або лазерні діоди), світловоду, в якому відбувається генерація, і резонатору, який утворено дзеркалами Брегга на кінцях оптоволокна. Лазерне випромінювання поширюється в середині волокна за рахунок повного внутрішнього відбиття, підсилившись – виходить через вихідне дзеркало.

При виборі лазерного технологічного обладнання для лазерного формоутворення слід розуміти, що загалом характер процесу подібний для всіх типів лазерів. Різниця полягає в ефективності використання лазерної енергії та у величині ККД самого лазера. Відомо, що металами краще поглинається лазерна енергія з меншою довжиною хвилі, тому ефективність використання випромінювання твердотільних та волоконних лазерів буде більшою ніж газових СО₂ лазерів. Окрім того, волоконний лазер має найвищий ККД з усіх типів лазерів, відомих в даний час. Тому, можна сказати, що використання волоконного лазера є найвигіднішим з економічної точки зору. Але оскільки його пучок частіше за все має рівномірний, або кусково лінійний розподіл інтенсивності по перерізу, його діаметр світлової плями на заготовці повинен бути дещо меншим, ніж той, що використовується при Гаусовому розподілі.

Окрім самого випромінювача, при будь якій точній технологічній операції необхідне використання роботизованої установки яка здатна забезпечити правильний закон руху променя по поверхні, а також підтримувати сталу відстань від фокусуючого елемента до листа. Якщо форма майбутньої деталі дозволяє використати трьохкоординатну оптичну транспортну фокусувальну систему можна обійтись класичною рухомою порталною рамою, на якій встановлено механізми поперечної та глибинної подачі. Однак, якщо необхідно сформувати деталь складної конфігурації з малими радіусами кривизни потрібна п'ятикоординатна установка з двома кутовими приводами та трьома лінійними

рис.32.



Рис.32 Оптична транспортувально-фокусуюча роботизовано система

Лише в цьому випадку можна досягти того, що в будь яку точку заготовки можна буде спрямувати лазерний промінь по нормалі. В іншому випадку, при відхиленні від нормалі на значний кут відбудеться спотворення форми плями лазерного променя, що призведе до зміни умов опромінення та розмірів зони нагріву.

Висновки

У світі, ведеться активний пошук засобів швидкої точної та якісної обробки елементів конструкції, в тому числі і обшивки літаків або суден. На створення нових моделей відводяться чималі фінансові затрати, виробник відчуває потребу у впровадженні новітніх технологій на виробництві та при створенні експериментальних прототипів. Також безперервно ведеться пошук найоптимальнішої форми фюзеляжу або корпусу суден, що потребує регулярного виготовлення зразків для випробувань в умовах передбаченої

експлуатації. Останнім часом набирає популярність спосіб лазерного формоутворення, але все ще не існує точних фізичних моделей цього процесу.

В даній роботі Створено нову математичну модель лазерного теплового формоутворення, а також схеми його реалізації.

Основними параметрами процесу лазерного формоутворення виробів з металевих листів, які визначають продуктивність, якість та вартість обробки є: потужність лазерного випромінювання, розподіл енергії в перерізі променя, розмір зони фокусування та швидкість її переміщення, кількість теплових джерел та характер їх взаємного розташування, кількість циклів нагрівання. Математичним моделюванням процесу формоутворення встановлено, що керування розподілом інтенсивності випромінювання дозволяє значно ефективніше використовувати енергію лазерного променя та являється потужним фактором управління процесом.

Створено нову розрахункову модель для визначення кута повороту перерізу заготовки в залежності від їх умов опромінення, доведено, що зразки сформовані в такий спосіб мають більшу міцність.

Впровадження даного методу формоутворення в промисловості посприє її розвитку.

Список джерел інформації

1. Кагляк О.Д. ЛАЗЕРНЕ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРОСТОРОВИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.
2. Борздыка А.М. Релаксация напряжений в металах и сплавах . А.М. Борздыка, Л.Б. Гецов. – М. : «Металлургия». 1978. – 255с.
3. Доценко В.И. Проблемы прочности . В.И. Доценко. - №11, 1974, с. 91-95.
4. Розенберг В.М. Основы жаропрочности металлических материалов . В.М. Розенберг. – М. : Metallurgiya. – 1973., 325 с.
5. Механические свойства материалов при повышенных температурах . пер. с англ. – М. : Metallurgiya, 1965. 294 с.
6. Кузнецов Р.И. ФММ. Р.И. Кузнецов, В.А. Павлов. – 1968, т.25., вып. 5, с. 934-941
7. Кузнецов Р.И. ФММ. Р.И. Кузнецов, В.А. Павлов. – 1966, т.21., вып. 2, с. 265-271
8. Фертам П. Деформация и прочность материалов. П. Фертам., пер.с англ. М. : Metallurgiya. – 1968
9. Новичков П.В. Изв. АН СССР. Металлы 1973, №3 с 168-174
10. Механизмы релаксационных явлений в твердых телах. Каунас., Каунасский политехнический институт. – 1974., 364с
11. Гецов Л.Б. Металловедение и термическая обработка металлов. , 1971, №3, с. 68 – 69
12. Вопросы металловедения и физики металлов. (Тр. Тульского политехнического института). Тула, Тульский политехнический институт. Вып.1.1972; вып.2, 1974.
13. Коваленко В.С. Лазерный нагрев быстрорежущей стали / В. С. Коваленко, В. С. Черненко, Н. И. Приходько и др.// Технология и орг. пр.-ва.— 1973.—№ 12.—С. 43—45

14. *Великих В.* Остаточные напряжения в углеродистых сталях после поверхностного упрочнения излучением CO₂ лазера. В. Великих, В. Гончаренко, А. Зверев, В. Картавец: *Металловедение и термическая обработка металлов*. № 4, 1985г, с 9-12.
15. *Романовский В.П.* Справочник по холодной штамповке . В.П. Романовский : шестое издание переработанное и дополненное. Л. : Машиностроение 1979
16. *Коваленко В.С.* Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. В.С. Коваленко, Л.Ф. Головкин. – К. : Техника, 1990, 190 с .
17. *Кан Р.У.* Сплавы, быстро закаленные из расплава. Р. У. Кан / *Физическое металловедение* : в 3 т.. – М. : Металлургия 1987 – т 2 – с 406-470.
18. *Новиков И.И.* Теория термической обработки металлов. И. И. Новиков. – М. : Металлургия. 1986. – 480 с.
19. *Андряхин В. М.* Упрочнение стали У10 лазерным излучением. В.М. Андряхин, С. Е. Зверев, Н. Г. Чеканова. – *Автомоб.пром-сть*, 1980, №5, с. 28-29.
20. *Андряхин В. М.* Влияние мощного СО₂ лазера на структуру и свойства чугунок. В.М. Андряхин, Н. Г. Чеканова. – *Поверхность. Физика, химия, механика*, 1983, №3, с. 129-137.
21. *Волгин В.И.* Влияние лазерного легирования поверхности на твердость алюминиевого сплава АЛ-25. В.И. Волгин. – *Поверхность: физика, химия, механика*, 1983, №1, с. 125-128.
22. *Иерусалимская А.Н.* Структурное изменение вещества при воздействии световых импульсов ОКГ. А. Н. Иерусалимская, В.И. Самойлов, П. И. Уляков. – *Физика и химия обраб. материалов*, 1968, №4, с.26-34.
23. *Коваленко В.С.* Упрочнение деталей лучом лазера. В.С. Коваленко, Л.Ф. Головкин, Г.В. Меркулов. – К. : Техника, 1981. 132с.
24. *Коваленко В.С.* О напряженном состоянии поверхностных слоев материалов, упрочненных излучением лазера. В.С. Коваленко, А.И.

- Безыкорнов, Л.Ф. Головки. – Электрон. обработ. материалов, 1980, №2, с. 34-37.
25. *Коваленко В.С.* Повышение износостойкости металлорежущих инструментов с помощью лазерного излучения. В.С. Коваленко, Л.Ф. Головки. – Технология и орг. пр-ва, 1981, №2, с.42-46.
26. *Криштал М.А.* Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера. М.А. Криштал, А.А. Жуков, А.Н. Кокора. – М. : Металлургия, 1973. 192с.
27. *Коваленко В.С.* Обработка материалов импульсным излучением лазеров В.С. Коваленко. – К. : Вища школа. 1978
28. *Лазерная обработка сталей и титановых сплавов.* Ред. В.С. Томсинский. – Пермь : ППИ, 1991, 120с.
29. *Рыкалин Н.Н.* Лазерная обработка материалов. Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, А.Н. Кокора. – М. : Машиностроение, 1975. 296 с.
30. *Коваленко В.С.* Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. В.С. Коваленко, А.Д. Верхотуров, Л.Ф. Головки, И.А. Подчерняева. – М. : Наука, 1986. 275 с.
31. *Буравлев Ю.М.* некоторые особенности преобразования структуры сталей под воздействием лазерного излучения. Ю. М. Буравлев, И. В. Карпенко, Б. П. Надежда. – Физика и химия обраб. материалов, 1974, №3, с. 112-115.
32. *Вейко В. П.* Лазерная обработка. В. П. Вейко, М. Н. Либенсон. – Л. : Лениздат. 1973. 120с.
33. *Крапошин В. С.* Обработка поверхности металлических материалов лазерным излучением. В. С. Крапошин. – Поверхность. Физика, химия, механика, 1982, №3 с. 1-12.
34. *Кокора А. Н.* Обработка стали лучом лазера. А. Н. Кокора, А. А. Жуков, В. А. Шалашов. – Металловедение и терм. обраб. металлов. 1966, №2, с. 41-42.

35. Коваленко В. С. Исследование процесса получения микроотверстий фотонным лучом ОКГ. В. С. Коваленко, В. С. Черненко. – Технология и автоматизация машиностроения. 1968. №5 с. 26-32.
36. Лазерная обработка сталей и титановых сплавов. Ред. В. С. Томинский. – Пермь. 1991. 127 с.
37. Шур Е. А. Повышение конструктивной прочности сталей при лазерной закалке. Е. А. Шур, С. С. Воинов, И. И. Клещева //Металловедение и терм, обраб. металлов.— 1982.— № 5.— С. 36—38.
38. Григорьянц А. Г. Методы поверхностной лазерной обработки. А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов.— М. : Высш. шк., 1987.— 191 с.
39. Козлов Г. И. Исследование термоупрочнения и износостойкости стали 45, обработанной излучением мощного многолучевого CO₂-лазера/ Г. И. Козлов, В. А. Кузнецов, Л. Д. Сокуренок и др.// Поверхность. Физика, химия, механика.— 1987.—№ 1.—С. 68—73.
40. Ashby M. F. The transformation hardening of steel surfaces by laser beams. 1. Hypo-eutectoid steels M. F. Ashby, K. E. Easterling //Acta met.— 1984.—Vol. 32, No. 11.—P. 1935—1944
41. Коваленко В. С. Влияние лазерного облучения на изменения физико-механических характеристик материалов. В. С. Коваленко, Л. Ф. Головкин, В. С. Черненко и др.// Хим. машиностроение: Респ. межвед. науч.-техн. сб.— 1985.—Вып. 41.—С. 54—59.
42. Воронов И. Н., Великих В. С, Гончаренко В. П. Особенности структуры заэвтектоидных инструментальных сталей после лазерной термической обработки. Воронов И. Н., Великих В. С, Гончаренко В. П. Изв. вузов. Чер. металлургия.— 1981.—№ 12.—С. 56—58.
43. Коваленко В. С. Вопросы технологии обработки отверстий малых диаметров лучом лазера. В. С. Коваленко, В. С. Черненко, Ле Ван Тиен. Вести. Киев. Политехн. ин-та. Сер. машиностроения. – 1971. Вып. 8.—С. 29—37.

44. Рыкалин И. Н. Лазерная и электроннолучевая обработка материалов / И. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора.— М. : Машиностроение, 1985.— 496 с
45. Мясникова Л. В. Лазерная обработка инструментальных сталей. Л. В. Мясникова, И. В. Троицкий, Л. И. Левин и др. Защит, покрытия на металлах.— 1982.— Вып. 16.— С. 23—25.
46. Еднерал Н. В. Микроструктура стали У10А после облучения ОКГ и закалки из жидкого состояния. Н. В. Еднерал, В. А. Лякишев, Ю. А. Скаков и др. // Физика и химия обраб. материалов.— 1981.— № 4.— С. 24—28.
47. Васильев В. Ю. Влияние лазерной обработки на коррозионные свойства чугуна СЧ 24—44 и стали У10. В. Ю. Васильев, Н. В. Еднерал. и др. Защита металлов.— 1982.— Т. 18, вып. 3.— С. 450-453.
48. Головкин Л. Ф. Закономерности упрочнения железоуглеродистых сплавов непрерывным излучением мощного СО₂-лазера / Л. Ф. Головкин, В. С. Коваленко, В. С. Черненко и др. // Электрон, обраб. материалов. — 1980. - № 6. — 26 - 29.
49. Carbucicchio M. Structural modifications induces on some steels by laser surface melting. M. Carbucicchio, G. Paloinbarini // Thin Solid Films. — 1985. Vol. 126, No. 3-4. P. 293-298.
50. Carbucicchio M. Surface structures produced in 1C – 1, 5Cr and 0.38C—Ni—Cr—Mo steels by high – power CO₂ laser processing. M. Carbucicchio, G. Paloinbarini // J, Mater. Sci.—1986.— Vol. 21, No. 1.— P. 75—82.
51. Carbucicchio M. Some effects of laser treatments on medium carbon steels. M. Carbucicchio, G. Sambogna, G. Palombarini // Hyperfine Interact. 1986.—Vol. 28, No. 1—4 —P. 1021 — 1024.
52. Denghel N. Cercetari privind tratamentul termic superficial al materialelor metalice prin iradiere cu laser CO₂. N. Denghel, A. Mehlman et al. // Metallurgia (RSR).— 1982.— Vol. 34, No. 5.— P. 274-278.

53. *Chabrol C.* Interaction laser-matiere et contraintes residuelles: cas de transformations en phase solide. C. Chabrol, A. B. Vannes et al.// Mem. et stud. scl. Rev. met.— 1985.— Vol. 82, No. 5.— S. 223—231.
54. *Mehlhorn H., Herzer H.* Termische Oberflächenbehandlung mit Hilfe von CO₂ — laser. Mehlhorn H., Herzer H. // Feingeratetechnik.— 1983.— B. 32, No. 6.— S. 272—276.
55. *Сафонов А. Н.* Влияние исходной структуры на упрочнение стали ШХ15 при обработке излучением CO₂ лазера . А. Н. Сафонов, В. М Тара-генко. А. Ф. Басков и др.// Металловедение и терм, обраб. металлов.— 1985.— № 4.— С. 5—9
56. *Черненко В. С.* Электронно-лучевое и лазерное упрочнение сталей. В. С. Черненко . Вестн. Киев, политехи, ин-та. Машиностроение.— 1984. – Вып. 21. – С. 52-56.
57. *Владимирова О. В.* Упрочнение рабочих поверхностей деталей и измерительного инструмента высокой точности с помощью CO₂-лазера. О. В. Владимирова. – Металловедение и терм, обраб. металлов. – 1983. - № 5. – С. 17-18.
58. *Гуйва В. А.* Влияние лазерного облучения на структуру штамповой стали Х12М . В. А. Гуйва, Р. Т. Гуйва, А. А. Левченко и др.// Изв. вузов. Чер. металлургия.— 1980,—№ П.—С. 106—111.
59. *Бураков В. А.* К вопросу о теплостойкости стали Р6М5 после лазерной обработки. В. А. Бураков, Г. И. Бровер, Н. М. Буракова // Металловедение и терм, обраб. металлов. – 1982 . № 9. - С. 33-36.
60. *Дьяченко В. С.* Влияние режимов импульсной лазерной обработки на структуру и свойства быстрорежущих сталей. В. С. Дьяченко // Металловедение и терм, обраб. металлов. – 1986. № 9. – С . 11-14.
61. *Barton G.* Laserumschmelzharten von Schnellarbeitsstählen. G. Barton, H. W. Bergman, J. Betz. – Elektrowarme int.— 1985.— B. 43, No. 4.— S. 177—183.

62. Бративник Е. В. Применение лазерной закалки для поверхностного упрочнения инструментальных сталей . Е. В. Бративник, В.С. Великих, В. П. Гончаренко и др.// Технология и орг. пр-ва.— 1980.— № 1.— С. 42—43.
63. Миркин Л. И. Физические основы обработки материалов лучами лазера . Л. И. Миркин. – М. : Изд-во МГУ, 1975.— 383 с.
64. Bergmann H. W. Harten und Veredeln von Oberflächen von Bauteilen mit Laserbestrahlung. H. W. Bergmann //Maschinenmarkt.— 1986.— В. 92, No. 43.— S. 72—74; 76—78.
65. Углов А. А. Воздействие лазерного излучения на инструментальные углеродистые и нержавеющие мартенситные стали / А. А. Углов, В. М. Матухнов, Т. П. Шмырева и др.// Физика и химия обраб.материалов.— 1986.— № 5.— С. 38—45.
66. Девойно О. Г. О поверхностном упрочнении лазерным лучом. О. Г. Девойно, Г. М. Яковлев Г. М. // Машиностроение: Респ. межвед. науч.-техн. сб.—Минск, 1983.—№8.—С. 127—128.
67. Малеев Д. И. Упрочнение нержавеющих сталей излучением лазера / Д. И. Малеев, А. Н. Нонокшинова, С. С. Самонлович // Металловедение и тер. обраб. металлов.— 1980.— № 10.— С. 24—25.
68. Шабанова И. Н. Исследование сталей мартенситного и мартенситностареющего класса после лазерного воздействия И. Н. Шабанова, А. Н. Новокшинова // Радиационно-стимулирующие явления в твердых телах: Межвуз. сб.— Свердловск, 1984.— №6.— С. 34—38
69. Ramos J. Microstructure and microhardness study of bent Al-2024-T3. J. Ramos, J. Magee, K. Watkins / Journal of laser application. Vol. 13, num. 1, February 2001.
70. Постников В. С. Лазерное упрочнение поверхности титана. В. С. Постников, В. С. Томсинский, В. В. Будцова / Лазерная обработка сталей и титановых сплавов . межвузовский сборник научных трудов. – Пермь 1991. С. 73-78

71. *Namba, Y.* Laser Forming in Space, Y. Namba, C.P. Wang (Ed.). Proceedings of the International Conference on Lasers'85, Osaka, Japan. 1985 Pp: 403–407
72. *Scully K.* Laser Line Heating . K. Scully. Journal of Ship Production. Vol. 3; 1987 pp: 237–246.
73. *Hennige T. D.* *On the Working Accuracy of Laser Bending.* , T. D. Hennige, S. Holzer, F. Vollertsen. *Journal of Materials Processing Technology.* 1997. Vol. 71; pp:422-432
74. *Hu Z.* Computer Simulation and Experimental Investigation of Sheet Metal Bending Using Laser Beam Scanning. Z. Hu, M. Labudovic, H. Wang. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2001. Vol. 41; pp:589–607.
75. *Chen G.F.* Experimental and 3D Finite Element Studies of CW Laser Forming of Thin Stainless Steel Sheets. G. F. Chen, X. F. Xu. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2001. Vol. 123; pp.66-74
76. *Vollertsen F.* Mechanisms and Models for Laser Forming. F. Vollertsen Laser Assisted Net Shape Engineering. Proceedings of the LANE'94. 1994. Vol.1; pp: 345-360
77. *Magee, J.* *Edge Effects in Laser Forming.* J. Magee, K.G. Watkins, W.M. Steen. *Laser Assisted Net Shape Engineering 2, Proceedings of LANE'97, 1997. Meisenbach Bamberg.* pp:399-406.
78. *Lawrence J.* The Forming of Mild Steel Plates with a 2.5 kW High Power Diode Laser. J. Lawrence, M.J.J. Schmidt, L. Li International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2001. Vol. 41; pp: 967–977
79. *Scully K.* Laser Line Heating. K. Scully. Journal of Ship Production. 1987. Vol. 3; pp: 237–246.
80. *Sprenger A.* Influence of Strain Hardening on Laser Bending. A. Sprenger, F. Vollertsen, W. M. Steen. Laser Assisted Net Shape Engineering, Proceeding of the LANE'94. 1994. Vol.1; pp:361-370.

81. *Cheng J.* Micorstructure Integrated Modeling of Multiscan Laser Forming. J. Cheng, Y. Yao. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2002. Vol. 124; pp. 379-387
82. *Ashby M. F.* Transformation Hardening of Steel Surfaces by Laser Beams. Hypo-eutectoid Steels. M. F. Ashby, K. E. Easterling. Acta Metallurgica. 1984 Vol. 32(11); pp:1935-1948.